Meteorološka merenja

dr Vladan Vučković
Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu
vvladan@ff.bg.ac.rs

19. oktobar 2015.

Sadržaj

1 Uvod **1**

1.1 Dizajn i odabir senzora . . . 1

1.1.1 Funkcionalni model mernog sistema . . . 1

1.1.2 Izvori grešaka . . . 3

1.1.2.1 Statičke greške . . . 3

1.1.2.2 Dinamičke greške . . . 4

1.1.2.3 Drift . . . 4

1.1.2.4 Greške izlaganja . . . 4

1.2 Standardi . . . 4

1.2.1 Kalibracija . . . 4

1.2.2 Karakteristike . . . 5

1.2.3 Izlaganje . . . 5

1.2.4 Proceduralni standardi . . . 6

1.3 Integracija sistema . . . 6

1.3.1 Instrumentalne platforme . . . 6

1.3.2 Sistemi za komunikaciju . . . 7

1.3.3 Izvori napajanja . . . 7

1.4 Meteorološka osmatranja . . . 8

1.4.1 Reprezentativnost . . . 8

1.4.2 Opšti zahtevi za meteorološku stanicu . . . 9

1.4.2.1 Automatske meteorološke stanice . . . 9

1.4.2.2 Meteorološki osmatrači . . . 9

1.4.2.3 Odabir mesta i izlaganje . . . 9

2 Statičke karakteristike senzora **13**

2.1 Definicije . . . 13

2.2 Statička kalibracija . . . 15

2.2.1 Definicije termina povezanih sa grafikom transfera . . . 16

2.2.2 Postupak kalibracije . . . 18

2.2.2.1 Bias (procena sistematske greške), nepreciznost i netačnost . . . 20

2.2.3 Primer izvođenja statičke kalibracije . . . 21

3 Merenje temperature **25**

3.0.4 Jedinice i skale . . . 25

3.0.5 Meteorološki zahtevi . . . 26

3.1 Inercija termometara 27
3.2 Senzori za temperaturu 33
3.2.1 Termalno širenje 33
3.2.1.1 Termometri sa tečnošću 33
3.2.1.2 Bimetalne trake 36
3.2.2 Termoelektrični senzori 38
3.2.3 Senzori električnog otpora 40
3.2.3.1 Otporni temperaturni detektori 40
3.2.3.2 Termistori 44
3.3 Izlaganje senzora za temperaturu 46

4 Merenje vlažnosti vazduha **49**
4.1 Pritisak vodene pare 49
4.2 Veličine koje karakterišu vlažnost vazduha 50
4.3 Metodi merenja vlažnosti 52
4.3.1 Uklanjanje vodene pare iz vlažnog vazduha 52
4.3.2 Dodavanje vodene pare vlažnom vazduhu 52
4.3.2.1 Psihrometarska formula 54
4.3.3 Ravnotežna sorpcija vodene pare 56
4.3.3.1 Električni higrometri 58
4.3.3.2 Mehanički higrometri 60
4.3.4 Merenje fizičkih osobina vlažnog vazduha 62
4.3.4.1 Spektroskopski higrometar 62
4.3.5 Postizanje ravnoteže para-tečnost i para-čvrsto stanje 65
4.3.5.1 Higrometar tačke rose i tačke slane 65
4.3.5.2 Zasićeni rastvor soli 66
4.4 Kalibracija senzora za vlažnost vazduha 69

5 Merenje pritiska **71**
5.1 Direktno merenje pritiska 71
5.1.1 Živini barometri 72
5.1.2 Aneroidni barometri 78
5.2 Indirektno merenje pritiska 82
5.2.1 Tačka ključanja tečnosti 82
5.3 Poređenje različitih tipova barometara 85
5.3.1 Živini barometri 85
5.3.2 Aneroidni barometri 85
5.3.3 Hipsometar 86
5.4 Postupak očitavanja i primena korekcije kod Fortenovog barometra 86

6 Merenje vetra **89**
6.1 Metodi merenja 89
6.1.1 Sila pritiska vetra 89
6.1.1.1 Anemometar sa čašicama 90
6.1.1.2 Anemometar u obliku cilindra ili sfere 93
6.1.1.3 Anemometar u obliku pločice 95
6.1.1.4 Pitoova cev 96

6.1.2 Termoanemometri 97
6.1.2.1 Anemometri sa vrućom žicom ili filmom 98
6.1.3 Zvučni anemometar 102
6.2 Merenje pravca vetra 104
6.3 Izlaganje anemometara 112
6.4 Obrada podataka o vetru 113

7 Merenje zračenja **115**
7.1 Definicije 115
7.2 Metodi merenja zračenja 118
7.2.0.1 Pirheliometar 118
7.2.0.2 Piranometar 120
7.2.0.3 Pirgeometar 123
7.2.0.4 Pirradiometar 123
7.3 Izlaganje 123
7.4 Merenje trajanja sijanja Sunca 125
7.4.0.5 Piranometarski metod 126
7.4.0.6 Kembel-Stoksov heliograf 126

8 Merenje padavina **129**
8.1 Definicije 129
8.2 Metodi merenja 129
8.2.1 Tačkasta merenja 129
8.2.1.1 Akumulacioni kišomeri 130
8.2.1.2 Merenje snega 135
8.2.1.3 Optički kišomer 138
8.2.1.4 Detektori padavina 139
8.2.1.5 Disdrometar 139
8.2.1.6 Izlaganje 140
8.2.1.7 Kalibracija 141
8.2.1.8 Izvori grešaka 142
8.3 Merenje padavina meteorološkim radarom 143
8.3.1 Komponente radara 144
8.3.1.1 Vremenska usklađenost signala 144
8.3.1.2 Merenje rastojanja 145
8.3.2 Radarska jednačina 157
8.3.2.1 Radarska jednačina za meteorološke ciljeve 158
8.3.2.2 Relacija između Z i intenziteta padavina 161
8.3.3 Procena količine padavina ATI metodom 163

9 Merenje isparavanja **165**
9.1 Definicije 165
9.2 Metodi merenja isparavanja 166
9.2.1 Atmometri 167
9.2.2 Evaporimetri u obliku sudova i rezervoara 168
9.2.2.1 Isparitelj klase A 168
9.2.2.2 Isparitelj GGI-3000 169

9.2.2.3 Isparitelj površine 20 m^2 . . . 169
9.2.2.4 Postavljanje isparitelja u obliku sudova i rezervoara 169
9.2.3 Evapotranspirometri (lizimetri) . . . 169
9.3 Metodi izračunavanja isparavanja . . . 171
9.3.1 Metod energetske ravnoteže . . . 172
9.3.2 Aerodinamički metod . . . 175
9.3.3 Kombinovani aerodinamički i energetski metod . . . 177

10 Merenje vidljivosti 181
10.1 Definicije . . . 181
10.2 Merenje meteorološkog optičkog rastojanja . . . 183
10.2.1 Instrumentalno merenje ekstinkcije svetlosti . . . 183
10.3 Merenje visine oblaka . . . 186
10.3.1 Rotacioni silometar . . . 186
10.3.2 Laserski silometar . . . 187

11 Visinska merenja 189
11.1 Metodi za izvođenje visinskih merenja . . . 189
11.1.1 Daljinska merenja . . . 189
11.1.2 In-situ platforme . . . 191
11.2 Meteorološki baloni . . . 191
11.3 Merenje vetra na visini . . . 194
11.3.1 Teodoliti . . . 196
11.3.2 Radar . . . 197
11.3.2.1 Radarski reflektori . . . 198
11.3.2.2 Transponderski sistemi . . . 199
11.3.3 Uređaji za navigaciju . . . 199
11.3.3.1 Loran-C . . . 200
11.3.3.2 Globalni sistem za pozicioniranje - GPS . . . 201
11.4 Radio-sonde . . . 206

Slike 207

Tabele 213

Bibliografija 214

Indeks 217

Glava 1

Uvod

1.1 Dizajn i odabir senzora

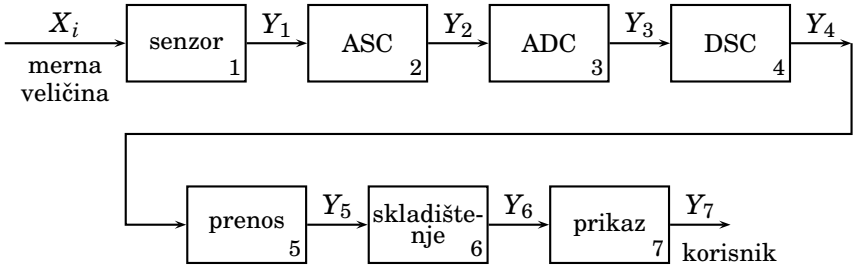
Instrument je uređaj koji mora da sadrži senzor, uređaj za kondicioniranje signala i displej podataka. Dodatno, instrument može da sadrži konverter analognog u digitalni signal, uređaje za prenos i skladištenje podataka i mikroprocesor. Senzor je najvažniji deo instrumenta jer interaguje sa promenljivom koja se meri (mernom veličinom) i generiše izlazni signal koji je proporcionalan toj promenljivoj. Na kraju ovog lanca mora da postoji displej podataka koji prikazuje podatke korisnicima.

Da bi se razumeo jedan senzor, mora se istražiti fizika senzora i njegova interakcija sa mernom veličinom. Postoji veliki broj senzora za merenje pritiska, temperature, vlažnosti i ostalih meteoroloških veličina. U ovom tekstu će biti reči o svakom od njih pojedinačno.

1.1.1 Funkcionalni model mernog sistema

Merni sistem interaguje sa atmosferom i isporučuje podatke (informacije o željenim atmosferskim veličinama) korisnicima. Opšti izgled mernog sistema prikazan je na slici 1.1. Merni sistem može da sadrži neki ili sve prikazane blokove, a kompleksniji sistemi mogu imati i mnogo više blokova. Neophodni blokovi mernog sistema su senzor 1, kondicioniranje analognog signala 2 (ASC) i displej 7. ADC je konvertor analognog signala u digitalni a DSC kondicioniranje digitalnog signala. Neobrađeni (sirovi) ulazni signal je X_i ili merna veličina (npr. temperatura vazduha), a krajnji izlazni signal je Y_7 (npr. temperatura u stepenima Celzijusa).

Blok 1 je senzor sa ulaznom veličinom (inputom) X_i, koja se zove merna veličina, i sirovim izlazom (autputom) Y_1. Svaki senzor je pretvarač, tj. uređaj koji konvertuje energiju iz jednog oblika u drugi. Neki instrument može da sadrži nekoliko pretvarača za konverziju energije od merene veličine preko nekoliko koraka do korisnog oblika, kao što je električni napon. Ovde je senzor primarni pretvarač, tj. onaj koji interaguje sa atmosferom. Blok 1 sadrži samo takav senzor. Drugi pretvarač, ako postoji, biće modelovan u sledećem bloku. Izlaz (autput) bloka 1 je primarni sirovi izlaz pretvarača u odgovarajućim jedinicama.



Slika 1.1: Funkcionalni model jednostavnog mernog sistema.

PRIMER 1.1 *Živin termometar može da se modeluje blokovima 1, 2 i 7. U senzoru, blok 1, toplotna energija se konvertuje u promenu zapremine žive u rezervoaru i tako u visinu stuba žive. Odnos prečnika stuba žive i zapremine rezervoara predstavlja kondicioniranja signala, blok 2, kojim se podešava pojačavanje termometra. Što je prečnik stuba manji veće je podizanje žive za dati porast temperature. Ulazni signal u blok 1, X_i, je temperatura vazduha u Kelvinima ili Celzijusima, a sirovi izlaz, Y_1, je zapremina žive. Posle pojačanja u bloku 2, sirovi izlaz postaje visina stuba žive Y_2. Skala ugravirana na staklu je displej (blok 7) koji obezbeđuje kalibracionu informaciju, što omogućava korisniku da pretvori visinu Y_2 u temperaturu Y_7.*

Kroz proces kalibracije može se dobiti polinom koji povezuje sirovi izlaz senzora Y_1, sa procenom merne veličine; $X_1 = c_o + c_1 Y_1$, c_o i c_1 su konstante (u ovom primeru je korišćen polinom prvog reda, mada se može koristiti i neki drugi). Veličina X_1 je procena merne veličine X_i, koja je zasnovana na poznavanju signala Y_1. Ako instrument ima sedam funkcionalnih blokova, kao na slici 1.1, moramo imati kalibraciju za svaki blok da bi procenili X_7 iz Y_7 ili, alternativno, možemo dobiti kalibraciju za kompletan sistem u jednom koraku koristeći $X_7 = c_o + c_1 Y_7$. Merna veličina je stvarno nepoznata jer svi instrumenti oduzimaju neku količinu energije od merne veličine i dodaju mali šum izlaznom signalu. Zbog toga, X_i može samo da bude procenjena i nikada ne može da bude potpuno tačna.

X_i i Y_n su signali, tj. veličine koje nose informacije o mernim veličinama kao što su temperatura, brzina vetra, brzina rotacije osovine, napon, jačina struje, otpor, frekvencija, itd. X_i, Y_1 i Y_2 su uvek analogni signali, odnosno, signali kod kojih je sadržaj informacije kontinualno proporcionalan mernoj veličini. Blok 2 sadrži kondicioner analognog signala (ASC) koji može da sadrži sekundarne pretvarače, pojačivač koji obezbeđuje pojačanje i uravnavanje i filtere za smanjivanje visokofrekventnog šuma.

PRIMER 1.2 *Anemometar sa čašicama je senzor koji konvertuje horizontalnu brzinu vetra u ugaonu brzinu osovine koja je povezana sa čašicama. Ulazni signal senzora je brzina vetra u ms^{-1} i izlazni signal je brzina rotacije osovine u $rads^{-1}$. Uobičajeno je da postoji sekundarni pretvarač, kao npr. dc generator povezan sa osovinom, koji konvertuje brzinu rotacije u napon. Taj napon je kontinualno proporcionalan brzini vetra. Umesto dc generatora mogu se koristiti magneti koji generišu jedan ac impuls pri svakom obrtu osovine (ako se koriste višestruki magneti generiše se više impulsa pri jednom obrtu). U tom slučaju sirovi izlaz senzora je brzina rotacije osovine u Hz.*

Blok 3 je konverter analognog u digitalni signal (ADC) i nalazi se u modernim mernim sistemima. Služi za konverziju analognog signala u diskretne (digitalne) vrednosti. Izlazni signal iz ADC-a je niz brojeva koji predstavljaju vrednosti ulaznog signala. Konverzije se obično vrše na diskretnim intervalima vremena; zbog toga je izlazni niz diskretan i po vrednostima i u vremenu.

PRIMER 1.3 *Ulazni signal u ADC je nakon koji je proporcionalan brzini vetra. ADC je podešen da uzorkuje napon na svake 3 sekunde i da ga konvertuje u binarni broj koji može da bude ulaz u mikroprocesor. Ovi binarni brojevi mogu biti shvaćeni kao celi brojevi (integeri kao u programskim jezicima Basic, FORTRAN ili C). Tada se iz ADC-a dobija izlazni signal u obliku integera na svake 3 sekunde.*

Kada signal postane digitalan, može se obrađivati elementima za digitalno procesuiranje (DSC - kondicioniranje digitalnog signala), najčešće mikroprocesorima, predstavljenim blokom 4. Ovde je zgodno primeniti kalibracionu jednačinu, korigovati nelinearnosti, kompenzovati sekundarne inpute, formatirati output i u nekim situacijama, upravljati radom displeja.

Blokovi 5 i 6 predstavljaju prenos i skladištenje podataka i ne moraju da postoje u jednostavnim sistemima ali su uobičajeni u velikim mernim sistemima. Prenos podataka može da se vrši pomoću žičane veze, telefonskih linija, direktnih radio linkova ili satelitskih releja. Skladištenje podataka može da uključi sve od privremenog čuvanja do konačnog arhiviranja podataka.

Displej podataka, blok 7, je neophodan i u najjednostavnijim sistemima i predstavlja mehanizam kojim korisnik pristupa podacima. On može da bude jednostavan analogni indikator (temperaturna skala u termometru sa živom) ili kompleksni grafički ekranski prikaz.

Na slici 1.1 ulazni signal sistema je prikazan kao jedan input, odnosno merna veličina. U stvarnosti, kod većine senzora postoji osetljivost na druge, neželjene signale koji se nazivaju sekundarni inputi. U dobro dizajniranom instrumentu, sekundarni inputi su minimizirani ili kontrolisani, mada se retko mogu potpuno odstraniti ili zanemariti. Kao što će biti razmatrano u tekstu koji sledi, sekundarni inputi su izvori greške mernog sistema.

1.1.2 Izvori grešaka

Postoje četiri osnovne kategorije grešaka* u meteorološkim mernim sistemima: statičke, dinamičke, drift i greške izlaganja.

1.1.2.1 Statičke greške

Statičke greške se javljaju u slučaju kada se ulazni signal ne menja sa vremenom, pri čemu autput postaje konstantan. Ovde postoje greške koje se javljaju pri primeni kalibracione jednačine. One mogu biti determinističke (histerezis, rezidualna nelinearnost i osetljivost na neželjene inpute) i slučajne (šum).

*greška se definiše kao razlika između izmerene i stvarne vrednosti

1.1.2.2 Dinamičke greške

Dinamičke greške su posledica postojanja promenljivog inputa. Po definiciji, dinamičke greške nestaju kada se input održava konstantnim dovoljno dugo da autput postane konstantan. Svaki senzor poseduje neki koeficijent inercije i može takođe da produkuje kompleksnije vrste grešaka.

1.1.2.3 Drift

Drift je posledica fizičkih promena koje se javljaju u senzoru u toku vremena. To je posebna vrsta greške, s obzirom da ovakve greške nisu sasvim statičke, niti se smatraju dinamičkim, jer su nezavisne od brzine promene inputa. Drift greške je teško izmeriti u većini mernih sistema; najdirektniji način da se one kompenzuju je česta kalibracija. Senzori kod kojih je drift linearan sa vremenom se mogu korigovati, ali ta korekcija može da izazove dodatnu neodređenost u finalnom merenju. Postoji puno slučajeva gde se drift ne menja linearno sa vremenom; ponekad se menja iznenada.

1.1.2.4 Greške izlaganja

Ovo je vrlo posebna kategorija grešaka. One su prouzrokovane nesavršenim uparivanjem senzora i merene veličine. Dobar primer je korišćenje termometra za merenje temperature vazduha. Senzor neće nikada imati tačno istu temperaturu kao vazduh zbog dinamičkih grešaka. Mogu se preduzeti različite mere koje će minimizirati razlike između temperature vazduha i temperature senzora, na primer, strujanjem vazduha oko senzora i njegovom zaštitom od izvora zračenja i kondukcije. Međutim, toplotni senzor će reagovati na razmenu radijacione energije sa Suncem ili drugim objektima i na provođenje toplote kroz mehaničke nosače isto kao na željeni konvektivni transport ka ili od vazduha koji struji oko senzora. Veličina ovih grešaka će biti funkcija globalnog zračenja Sunca, zaklona i efikasnosti konvektivne razmene toplote sa vazduhom, koja veoma zavisi od brzine vazdušnog toka oko senzora. Ovi izvori grešaka ne postoje u kalibracionim laboratorijama i tekve greške nisu uključene u specifikaciju senzora. Prema tome, navodi u vezi sa instrumentalnim greškama ne uključuju greške izlaganja. U dobro dizajniranim, propisno kalibrisanim i održavanim sistemima, greške izlaganja lako mogu prevazići sve ostale izvore grešaka.

1.2 Standardi

Postoji nekoliko tipova standarda koji su značajni za meteorološke merne sisteme i odnose se na: kalibraciju, specifikaciju performansi, izlaganje i procedure. Svi moraju biti uzeti u obzir pri dizajniranju i izradi sistema.

1.2.1 Kalibracija

Kalibracioni standardi se čuvaju u laboratorijama za standarde u svakoj zemlji, kao što je npr. Nacionalni institut za standarde i tehnologiju (NIST) u Americi. U njima postoje standardi za temperaturu, vlažnost, pritisak, brzinu

vetra i za mnogo drugih veličina. Njihova tačnost je više nego dovoljna za meteorološke potrebe. Svaka organizacija koja je nadležna za održavanje mernih stanica mora da ima neku vrstu laboratorije za kalibraciju, uključujući i transfer standarda. Ovi standardi koji se koriste za lokalnu kalibraciju mogu da se šalju u laboratoriju za standarde radi poređenja sa primarnim standardima.

1.2.2 Karakteristike

Standardi o specifikaciji karakteristika se odnose na terminologiju, definicije termina i metod testiranja statičkih i dinamičkih karakteristika senzora. Mora postojati usklađenost u korišćenju termina kao što su vremenska konstanta, vreme odziva, inercija senzora i slično i značenju izabranih termina. Suštinski je važno da postoji standardni metod za testiranje senzora radi određivanja njihovih karakteristika. Bez takvih standarda, specifikacije karakteristika date od strane prodavca bi bilo teško protumačiti.

1.2.3 Izlaganje

Standardi izlaganja su neophodni za definisanje odgovarajućeg izlaganja za određenu klasu primena. Na primer, šta označava termin pravac i brzina površinskog vetra za sinoptičke razmere? Da li je prihvatljivo da se anemometar postavi u blizini zgrade? Ili na krovu zgrade? Za sinoptička osmatranja potrebno je da merenja budu reprezentativna za veliku oblast. Merenja anemometra koji je postavljen u blizini zgrade ili na njenom krovu bi bila pod velikim uticajem zgrade i zbog toga ne bi bila reprezentativna za veliku oblast. Na kojoj visini iznad zemlje bi trebalo meriti? Srednja brzina vetra je bliska nuli u blizini tla, tako da bi anemometar trebalo postaviti na standardnu visinu iznad tla. Norment (1992) i Oost (1991) su pokazali da i nosač senzora i sam senzor, zavisno od oblika, mogu da poremete strujanje vazduha. Da bi merenja bila uporediva, trebalo bi barem standardizovati visinu montiranja kao i dati standarde u vezi sa blizinom prepreka.

Svetska meteorološka organizacija (WMO) je propisala standardnu visinu na kojoj se postavljaju instrumenti za vetar od 10 m iznad ravnog, otvorenog terena. Rastojanje između anemometra i prepreke (zgrada, drveća i sl.) mora da bude najmanje deset puta veće od visine prepreke. Zbog toga ne bi trebalo postavljati anemometar na krovu zgrade.

Senzori za temperaturu, u skladu sa preporukom WMO, treba da budu postavljeni u zaklonu od zračenja, sa ili bez veštačke ventilacije, na visini od 1.25 do 2 metra iznad tla. Zaklon ne sme da se nalazi u senci ili u blizini drveća, zgrada ili ostalih prepreka. Merno mesto ne bi trebalo da se nalazi na strmoj padini ili u depresiji gde termički uslovi nisu reprezentativni za velike razmere. Postavljanje na vrhu zgrade se ne preporučuje zbog promene temperature sa visinom i poremećenja uslovljenih zgradom. Na mestima sa snežnim pokrivačem, poželjno je da senzor bude na konstantnoj visini u odnosu na površinu snega.

Merenje padavina je, zbog smanjenja uticaja vetra, najbolje izvoditi na čistinama okruženim žbunjem ili drvećem. Međutim, često se javlja zahtev da se kišomer postavi zajedno sa ostalim senzorima u blizini data logera (videti stranu

13). Rešenje ovog problema je da se svaki kišomer opremi zaklonom od vetra. Taj zaklon je dizajniran da minimizira uticaj vetra na zahvat kišomera.

U praksi, neki od ovih zahteva su međusobno isključivi tako da mnoga mesta ne ispunjavaju sve standarde izlaganja. Zbog toga je neophodno da se merna mesta pažljivo i kompletno dokumentuju fotografijama koje prikazuju teren.

1.2.4 Proceduralni standardi

Proceduralni standardi se odnose na izbor podataka za uzorkovanje, period osrednjavanja, kao i na jednostavne algoritme za najčešće računate veličine. Ovi standardi su sporo razvijani i do sada nisu potpuno usaglašeni. Kada se podaci koriste samo unutar jedne mreže i za usko definisane ciljeve, ovi standardi nisu tako važni. Međutim, kada se kombinuju podaci iz nekoliko mreža ili kada se podaci koriste u raznovrsnim primenama, poštovanje proceduralnih standarda postaje značajno. Primena ovih standarda zahteva mogućnost lokalne obrade, obično u sklopu data logera, platformu za prikupljanje podataka, ili postojanje nekih drugih elemenata sistema.

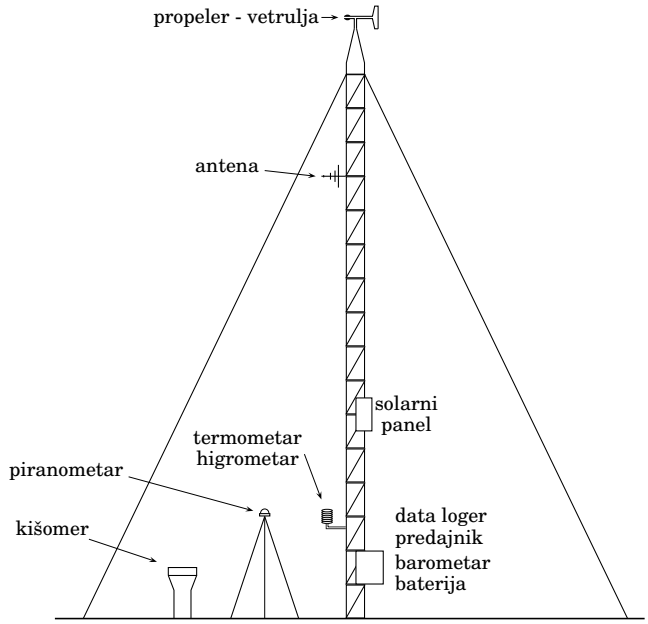
1.3 Integracija sistema

Pored izbora senzora i data logera, na dizajn mernog sistema utiču i drugi činioci. Izbor merne platforme, komunikacionog sistema i vrste napajanja ima značajan efekat na kompletan dizajn sistema. Ograničenja komunikacionog sistema mogu nametnuti položaj mernih mesta. Ograničenja napajanja mogu da onemoguće upotrebu određenih vrsta senzora.

Senzori se obično montiraju na nepokretnu platformu (jednostavni jarbol ili visoki stub) ili na pokretnu platformu (baloni, vazduhoplovi, brodovi, itd.). U idealnom slučaju podaci se prenose u realnom vremenu od mernog mesta ili platforme do centralnog uređaja za arhiviranje. U nekim slučajevima, komunikacija u realnom vremenu nije moguća, pa se podaci manuelno prikupljaju u periodičnim intervalima, obično u nekom elektronskom obliku. Postojanje ili nedostatak električnog napajanja mogu značajno da promene dizajn sistema.

1.3.1 Instrumentalne platforme

Ove platforme uključuju jarbole, zaklone za instrumente, visoke stubove, balone, zmajeve, automobile, brodove, bove, vazduhoplove, rakete i satelite. Platforme za sinoptičke podatke uključuju balone i satelite dopunjene bovama i brodovima na okeanima. Dodatno, vazduhoplovi se koriste za osmatranje tropskih ciklona, a neki podaci se prikupljaju tokom komercijalnih letova, radi kompletiranja podataka u osmatračkim mrežama. Vazduhoplovi se široko koriste u istraživanju olujnih nepogoda i svuda gde su potrebni visinski podaci visoke rezolucije. Kada se bira platforma, pažnja treba da bude usmerena na to gde će merenja da se vrše, da li će platforma biti fiksirana ili pokretna, kolika je njena cena, kako će biti postavljeni senzori na njoj. Do neke mere, neka platforma, pa i najjednostavniji stub za površinska merenja, interaguje sa atmosferom i menja izlaganje instrumenata. Kod jednostavnog stuba visine 10 m, prikazanog na



Slika 1.2: Desetometarski stub za površinska merenja (Brock i Richardson, 2001).

slici 1.2, senzor za vetar je postavljen na visini 10 m, a senzori za temperaturu i relativnu vlažnost na visini 1.5 m. Pored njih na stubu se nalaze radio antena za prenos podataka, solarni panel i baterija za napajanje, barometar i data loger. Pri postavljanju ovih senzora posebnu pažnju treba posvetiti njihovom izlaganju preovlađujućem vetru, radi minimiziranja uticaja stuba.

1.3.2 Sistemi za komunikaciju

Komunikaciona mreža je značajan deo skoro svakog meteorološkog mernog sistema na svim razmerama. Istorijski, meteorološke komunikacije su se zasnivale na kopnenim linijama i radio vezama. Geostacionarni i sateliti sa polarnim orbitama se u skorije vreme koriste za prenos podataka u sinoptičkim i makrorazmernim, pa čak i u mezorazmernim mernim sistemima. Komercijalni sateliti se koriste za prenos podataka od centra, pomoću sofisticiranog predajnika, do korisnika koji su opremljeni jednostavnim antenama i prijemnicima. Idealni komunikacioni sistem bi trebao da prenese podatke sa udaljenog mernog mesta do centralnog uređaja i u suprotnom smeru, bez kašnjenja i bez ograničenja količine podataka koji se prenose. Dvostrana komunikacija ka i od mernog mesta je neophodna radi sinhronizacije lokalnih satova u data logerima, za učitavanje operativnih programa u data logere i za pravljenje zahteva za posebnim podacima.

1.3.3 Izvori napajanja

Potrošnja struje mernog sistema je obično od suštinske važnosti. Mnogi merni sistemi se nalaze na mestima na kojim se ne može koristiti napajanje iz

električne mreže. U tom slučaju izvor napajanja su baterije, ponekad dopunjene solarnim panelima. Takvi sistemi moraju da rade sa vrlo ograničenim energetskim budžetom, što utiče na izbor komponenti i ukupan dizajn sistema. Sistemi koji se napajaju pomoću baterija moraju imati senzore sa malom potrošnjom i/ili senzore koji se uključuju samo kada je potrebno. Kod njih se ne mogu koristiti grejači i lokalne računske performanse moraju biti veoma ograničene. Zbog toga sve komponente moraju biti projektovane za rad u očekivanom temperaturnom opsegu.

1.4 Meteorološka osmatranja

Meteorološka (kao i ekološka i geofizička) osmatranja se vrše iz različitih razloga. Koriste se za pripremanje prognoza, analiza vremena, za najavu opasnih vremenskih pojava, za klimatske studije, za lokalne operacije koje zavise od vremenskih prilika (na primer za letove sa lokalnih aerodroma, građevinske radove), za hidrologiju i agrometeorologiju i za meteorološka i klimatološka istraživanja.

1.4.1 Reprezentativnost

Reprezentativnost jednog osmatranja je stepen do kojeg ono tačno opisuje vrednost promenljive koja je potrebna za specifičnu namenu. Prema tome, reprezentativnost nije fiksirani kvalitet jednog osmatranja, već je rezultat spoja tačnosti instrumenata, intervala merenja i izlaganja u odnosu na zahteve neke posebne primene. Na primer, sinoptička osmatranja treba tipično da budu reprezentativna u oblasti do 100 km oko stanice, a za male razmere ili lokalne primene posmatrana oblast treba da bude 10 km ili manja.

Posebno, aplikacije imaju svoje preferirane vremenske i prostorne razmere osrednjavanja, gustinu stanica i rezoluciju fenomena - male za poljoprivrednu meteorologiju, velike za globalnu dugoročnu prognozu. Prognostičke razmere su u bliskoj vezi sa vremenskim razmerama pojava; radi detektovanja pojava malih razmera i zbog njihovog brzog razvoja kratkoročne prognoze vremena zahtevaju češća osmatranja iz gušće mreže stanica na ograničenoj oblasti. Horizontalne meteorološke razmere se mogu klasifikovati na

- Mikrorazmere (manje od 100 m) za agrometeorologiju, npr isparavanje;
- Toporazmere ili lokalne razmere (100 m - 3 km), npr. zagađenje vazduha, tornada;
- Mezorazmere (3 - 100 km), npr. olujne nepogode, vetar s mora ili s kopna;
- Velike razmere (100 - 3000 km), npr. frontovi, različiti cikloni, klasteri oblaka;
- Planetarne razmere (veće od 3000 km), npr. dugi talasi u gornjoj troposferi.

1.4.2 Opšti zahtevi za meteorološku stanicu

Na tipičnoj klimatološkoj stanici ili površinskoj sinoptičkoj stanici mere se ili osmatraju sledeći meteorološki elemenati: sadašnje vreme, prošlo vreme, pravac i brzina vetra, količina oblaka (oblačnost), vrsta oblaka, visina baze oblaka, vidljivost, temperatura, relativna vlažnost, atmosferski pritisak, padavine, snežni pokrivač, trajanje osunčavanja i/ili sunčevo zračenje, temperatura tla i isparavanje. Postoje instrumenti za merenje svih nabrojanih elemenata, osim za vrstu oblaka. Međutim, sa sadašnjom tehnologijom, instrumenti za sadašnje i prošlo vreme, količinu i visinu oblaka i za snežni pokrivač ne mogu da vrše merenja u celom opsegu meteoroloških pojava, za razliku od osmatrača.

Na nekim meteorološkim stanicama se vrše radiosondažna merenja, merenja vlage u tlu, ozona i sastava atmosfere i neka druga specijalizovana merenja.

1.4.2.1 Automatske meteorološke stanice

Većinu meteoroloških elemenata, neophodnih za sinoptičke, klimatološke ili aeronautičke potrebe, moguće je meriti automatskim instrumentima. Sa usavršavanjem automatskih sistema povećava se broj automatskih meteoroloških stanica u odnosu na broj stanica sa ljudskom posadom.

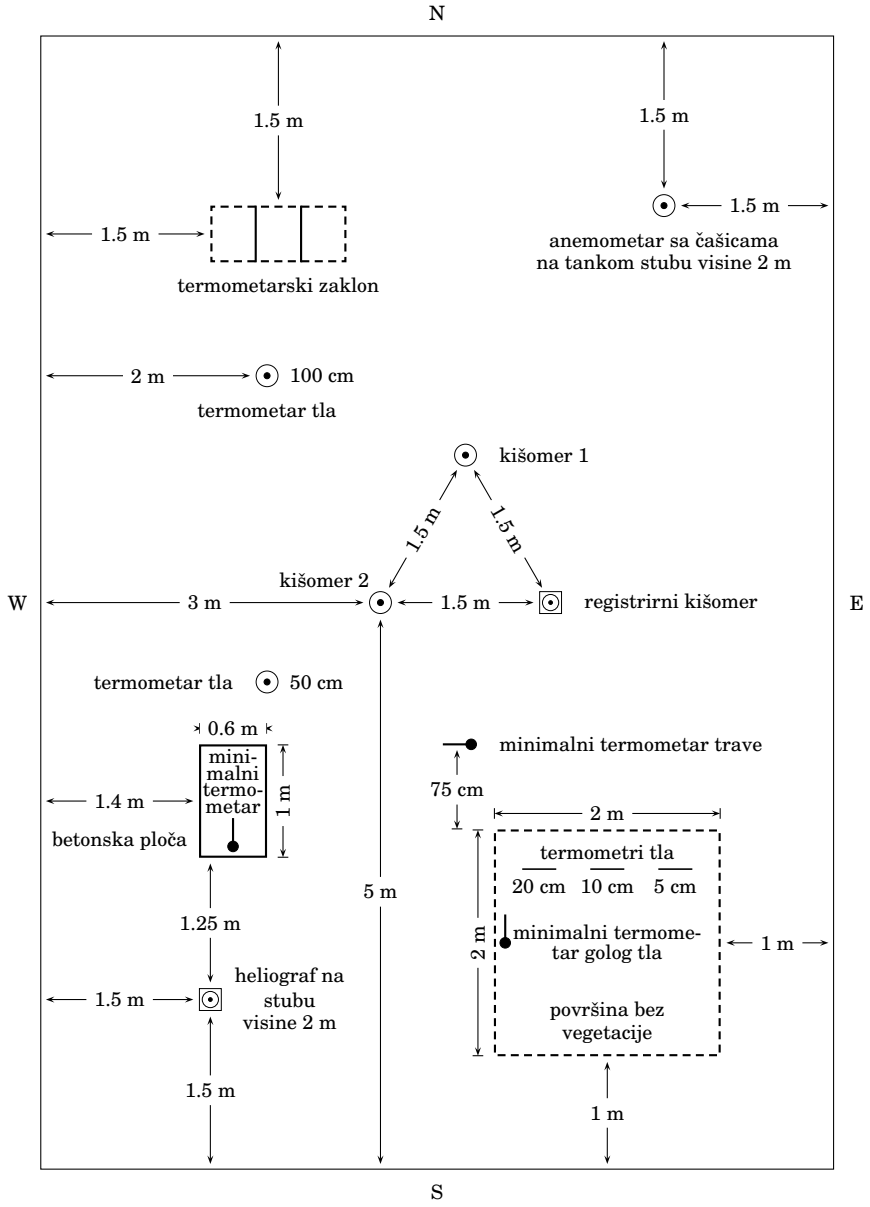
1.4.2.2 Meteorološki osmatrači

Meteorološki osmatrači su neophodni iz više razloga:

- Da vrše sinoptička i/ili klimatološka merenja sa potrebnom preciznošću i reprezentativnošću pomoću odgovarajućih instrumenata;
- Da održavaju instrumente, dokumentaciju i osmatračka mesta;
- Da kodiraju i šalju osmatranja (u odsustvu automatizovanog kodiranja i komunikacionih sistema);
- Da održavaju uređaje za snimanje;
- Da vrše nedeljna i/ili mesečna snimanja klimatoloških podataka u slučaju da ne postoje automatski sistemi ili da su neodgovarajući;
- Da vrše dodatna ili rezervna osmatranja u slučaju da automatski uređaji ne mere sve zahtevane elemente ili su van pogona;
- Da odgovaraju na pitanja javnosti ili stručnih službi.

1.4.2.3 Odabir mesta i izlaganje

Meteorološke stanice su dizajnirane tako da se mogu vršiti reprezentativna merenja (ili osmatranja) u skladu sa njihovom namenom. Stanice u sinoptičkoj mreži bi trebalo da vrše osmatranja koja odgovaraju zahtevima sinoptičkih razmera, dok bi avio-osmatračke meteorološke stanice trebalo da vrše osmatranja koja opisuju uslove specifične za lokalno mesto (aerodrom). U slučaju da se stanice koriste za nekoliko namena, na primer za sinoptičke, klimatološke i



Slika 1.3: Raspored instrumenata na meteorološkoj stanici severne hemisfere (WMO, 2012).

avio-namene, najstroži zahtevi će diktirati preciznu lokaciju osmatračkog mesta i odgovarajućih senzora.

Pri izboru mesta i zahteva za izlaganje instrumenata za tipičnu sinoptičku ili klimatološku stanicu u regionalnoj ili nacionalnoj mreži treba primenjivati sledeće preporuke:

a. Instrumenti koji se postavljaju napolju trebalo bi da budu instalirani u ograđenom prostoru na tlu površine približno 10×7 metara, koji je obrastao kratkom travom ili je površina reprezentativna za datu okolinu. U

ograđenom prostoru trebalo bi da postoji jedan deo tla bez vegetacije površine oko 2 m × 2 metra, koja je predviđena za osmatranja stanja tla i merenje temperature tla na dubinama do 20 cm; temperaturu tla na dubinama većim od 20 cm moguće je meriti van ovog dela; primer stanice sa dobrim rasporedom instrumenata prikazan je na slici 1.3.

b. Ne bi trebalo da postoji strmo nagnuto zemljište u blizini, niti bi mesto trebalo da bude u udubljenju. Ako ovi uslovi nisu ispunjeni osmatranja bi mogla da pokažu specifičnosti potpuno lokalnog značaja.

c. Mesto bi trebalo da bude udaljeno od drveća, zgrada, zidova i sličnih prepreka. Udaljenost bilo kakve prepreke (uključujući i ogradu) od kišomera treba da bude veća od dvostruke visine objekta u odnosu na obruč kišomera, poželjno četiri puta veća.

d. Instrument za merenje trajanja osunčavanja, kišomer i anemometar moraju biti postavljeni tako da budu zadovoljeni zahtevi koji važe za njih, a poželjno je da budu na istom mestu sa ostalim instrumentima.

e. Treba napomenuti da ograda ne može biti najbolje mesto sa koga se procenjuju brzina i pravac vetra; poželjnije je neko drugo mesto izloženije vetru.

f. Veoma otvorene lokacije koje su pogodne za većinu instrumenata su neodgovarajuće za kišomere. Zahvat kišomera na takvim mestima će biti manji u odnosu na mesta sa slabim vetrom, pa će biti potrebna neka vrsta zaklona.

g. Ako objekti u blizini instrumenata, kao što su drveće ili zgrade, značajno zaklanjaju horizont, za merenje osunčavanja i zračenja treba odabrati alternativni položaj.

h. Mesto koje se koristi za osmatranje oblaka i merenje vidljivosti trebalo bi da bude što je moguće više otvoreno i da daje najširi pogled na nebo i okolinu.

i. Za stanice koje se nalaze na obali poželjno je da imaju dobar pogled ka otvorenom moru, ali da se ne nalaze suviše blizu strmih obala, zbog formiranja vrtloga koji mogu da utiču na tačnost merenja vetra i padavina.

j. Noćna osmatranja oblaka i vidljivosti je najbolje vršiti sa mesta koja nisu izložena veštačkom osvetljenju.

Očigledno je da su neki od navedenih zahteva donekle kontradiktorni i iziskuju kompromisna rešenja.

Glava 2

Statičke karakteristike senzora

Karakteristike senzora se mogu klasifikovati u najmanje dve kategorije: statičke i dinamičke. Ponekad se uključuju dodatne kategorije drift i greške izlaganja. Karakteristike senzora u uslovima pri kojima je merena veličina konstantna ili se veoma sporo menja se mogu opisati statičkim parametrima. U slučaju kada se ulazni signal brzo menja za računanje relacije između inputa i autputa senzora se moraju koristiti diferencijalne jednačine. Statičke karakteristike izazvane trenjem ili drugim nelinearnim efektima bi mogle da znatno komplikuju diferencijalne jednačine, tako da se i u slučajevima kada input nije stacionaran, statičke i dinamičke karakteristike posebno razmatraju. Statičke karakteristike su određene pažljivim isključivanjem dinamičkih efekata. Dinamičke karakteristike su procenjene pod pretpostavkom da su isključeni ili kompenzovani svi statički efekti.

2.1 Definicije

Analogni signal. Signal kod koga je sadržaj informacija kontinuarno proporcionalan merenoj veličini. Ako električni senzor temperature ima autput u obliku napona, on će da fluktuira sa promenom temperature senzora. Autput će biti kontinuarno proporcionalan merenoj veličini (temperaturi) i analogan joj je, pa je prema tome autput senzora analogni signal.

Displej podataka. Mehanizam kojim se podaci prikazuju korisniku. Cev živinog termometra sa pričvršćenom skalom predstavlja displej podataka.

Skladište podataka (*eng. data storage*). Memorijski element ili mehanizam za čuvanje i kasnije korišćenje podataka, npr. disk ili magnetna traka. Takođe, to može biti i obično parče papira.

Data loger. Kompaktan uređaj koji se može jednostavno povezati sa različitim senzorima. On može da dobija signale od senzora, da ih konvertuje iz analognog u digitalni oblik, da izvršava određenu obradu digitalnog signala u skladu sa zadatim programom, da prikuplja podatke i da ih u određenim intervalima vremena ili na komandu spolja prenese na drugi uređaj.

Transmisija podataka. Proces slanja signala sa jednog mesta na drugo. Medijum za slanje podataka može biti parče papira, magnetna traka, radio ili svetlosni talasi ili telefonske žice.

Digitalni signal. Signal kod koga se sadržaj informacije menja u diskretnim koracima. Veličina koraka može biti proizvoljno mala, tako da crtež digitalnog signala može biti sličan analognom signalu. Međutim, zrnast oblik digitalnog signala će postati vidljiv ako se on prikaže u visokoj rezoluciji.

Drift. Drift se ponekad razmatra kao statička karakteristika, mada je on u stvari posebna kategorija. To je promena autputa prouzrokovana fizičkom promenom instrumenta. Instrument koji je upravo kalibrisan nema drift grešku. Kasnije fizičke promene, kao na primer pojava pukotina na dijafragmi aneroida, mogu izazvati značajne greške. Drift greška se može pojaviti postepeno ili naglo, zavisno od prirode fizičke promene. Drift je u opštem slučaju nepredvidiv i može se korigovati samo kalibracijom.

Instrument. Najjednostavniji instrument sadrži senzor i pretvarač (*eng. transducer*), a ako je potrebno i displej podataka. Živin termometar je instrument jer uključuje displej podataka: vidljivi stub žive i pričvršćenu skalu.

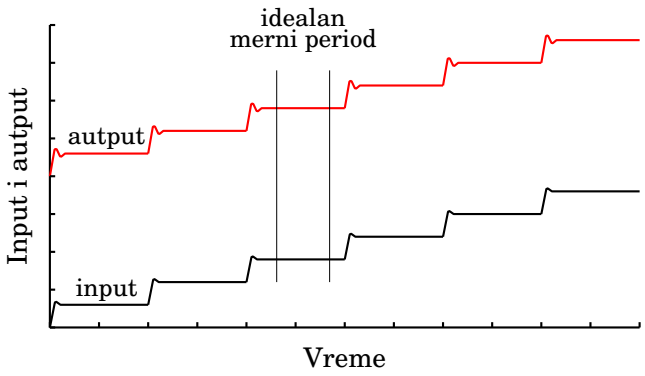
Merena veličina. Veličina koja se meri, kao temperatura, pritisak ili brzina vetra, koja je input senzora. Merena veličina ne može nikad da bude tačno određena - uvek postoji neka greška povezana sa merenjem.

Primarni i sekundarni inputi. Primarni input senzora je željeni input, tj. merena veličina. Sekundarni inputi su obično neželjeni ali se ne mogu izbeći, kao što je temperaturna osetljivost senzora za pritisak. Ako je željeni input živinog termometra temperatura vazduha, tada bi nepoželjni ili sekundarni inputi mogli da budu temperatura ruke kojom osmatrač drži termometar ili sunčevo zračenje koje zagreva termometar.

Senzor. Element koji prima energiju od merene veličine i stvara izlazni signal koji je na neki način povezan sa merenom veličinom. Tipični autput signali su mehaničko savijanje ili promena položaja, brzina rotacije, električni otpor, napon, frekvencija, itd. Senzor uvek oduzima jedan deo energije od sredine čija se karakteristika meri i uvek dodaje neki šum signalu. To onemogućava postojanje perfektnog merenja. Merena veličina je analogna promenljiva (menja se kontinuarno) i autput senzora je uvek analogan signal. Treba zapaziti da je u nekim instrumentima konverzija analognog u digitalni signal integrisana sa senzorom. Tada se može uočiti da je autput digitalan, ali kada se pažljivo istraži instrument, senzor i konverter mogu da se razlikuju.

Kondicioniranje signala. Operacije koje se izvršavaju nad signalom kojim se on konvertuje iz jednog oblika u drugi (npr. iz otpora u napon), radi povećavanja amplitude (pojačavanje), smanjenja šuma (filtriranje) ili kompenzacije neželjenih bočnih efekata kao npr. osetljivost senzora za pritisak od temperature.

Signal. Veličina koja sadrži informaciju. Električni napon proporcionalan temperaturi je signal koji prenosi informaciju o temperaturi. Ako je frekvencija vremensko zavisnog napona proporcionalna merenoj veličini, tada ona sadrži informaciju. U tom slučaju, napon ili jačina struje, iako možda važni iz drugih razloga, ne sadrže informaciju.



Slika 2.1: Proces statičke kalibracije (Brock i Richardson, 2001).

Pretvarač. Pretvarač je uređaj koji konvertuje energiju iz jednog oblika u drugi. Svi senzori su pretvarači, ali nisu svi pretvarači senzori. Senzor je primarni pretvarač koji interaguje sa merenom veličinom. Instrument obično sadrži i druge pretvarače za konverziju energije u pogodan oblik. Pretvarači mogu da budu aktivni ili pasivni, zavisno od toga da li zahtevaju ili ne korišćenje spoljašnjeg izvora napajanja.

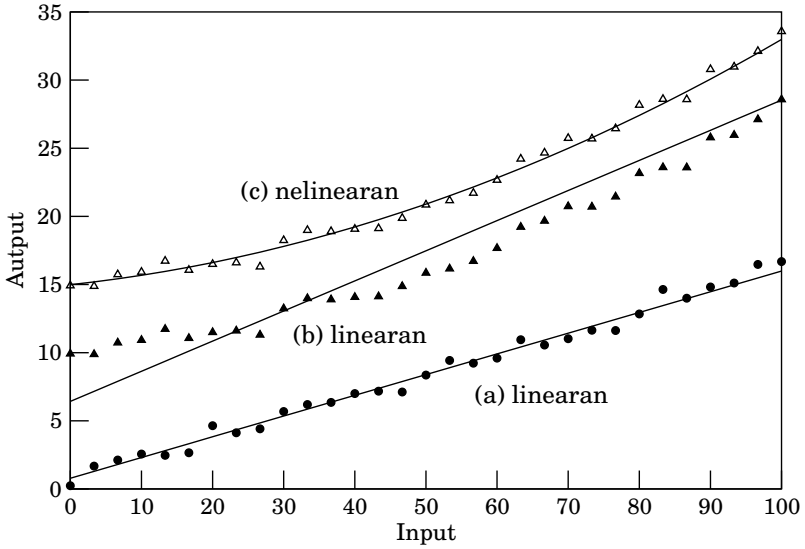
PRIMER 2.1 *Termometar sa živom konvertuje toplotnu energiju u promenu zapremine žive u rezervoaru i zatim u visinu stuba žive. Termometar sa živom je prema tome pasivni pretvarač koji nema spoljašnji izvor napajanja.*

PRIMER 2.2 *Primarni senzor u aneroidu je dijafragma koja konvertuje pritisak u savijanje. Sekundarni pretvarač konvertuje savijanje u električni signal.*

2.2 Statička kalibracija

Statička kalibracija se vrši menjanjem jednog inputa, obično na skokovit način, preko mogućeg opsega vrednosti, dok se ostali inputi, ako je moguće, održavaju konstantnim. Na svakom mernom koraku autput se meri pri stacionarnim uslovima. To su uslovi pri kojima se input održava stacionarnim dovoljno dugo da se autput stabilizuje, kao što je prikazano na slici 2.1. Kada autput postane konstantan, beleže se merenja inputa i autputa i input se pomera do sledećeg nivoa i proces se ponavlja. Na ovaj način se razvija input-autput ili relacija transfera (prenosa), za koju se pretpostavlja da je važeća pod navedenim uslovima za ostale moguće inpute (tj. možemo da kalibrišemo senzor za temperaturu u koracima od 10 stepeni i da tada pretpostavimo da je dobijena relacija tačna za bilo koju temperaturu unutar koraka).

Vertikalne linije na slici 2.1 prikazuju period u kojem su input i autput signali stabilni i gde kalibraciona merenja mogu da se izvrše. Osnovni cilj kalibracije je da se definiše tačnost instrumenta. Za izvršenje statičke kalibracije, moraju se koristiti referentni instrumenti za merenje inputa i autputa, koji su za red veličine tačniji od instrumenata koji se testiraju. Relacija transfera senzora, ili input-autput relacija je prikazana na slici 2.2. Na apscisi je prikazan input sa



Slika 2.2: Koncept statičke linearnosti. Input je prikazan na apscisi a autput na ordinati (Brock i Richardson, 2001).

pogodnim jedinicama: °C, K, itd.; na ordinati je stvarni fizički autput senzora, ili sirovi autput, u voltima, metrima, itd. Za termometar sa živom, apscisa slike transfera bi bila temperatura, u °C, a ordinata bi bila visina stuba žive, recimo u mm.

Na slici 2.2, linija (a) prikazuje linearni senzor sa fitovanom pravom linijom, linija (b) prikazuje senzor sa malom nelinearnošću, gde je prava linija fitovana podacima, i linija (c) prikazuje iste podatke kao u (b) ali sa krivom fitovanom podacima. Podaci u liniji (c) su, radi jasnoće, pomereni za 5 jedinica iznad podataka u liniji (b). Slučajne greške su iste u (b) i (c), ali je rezidualna greška nelinearnosti manja u (c). Rasipanje izmerenih vrednosti je prouzrokovano slučajnim (neponovljivim) greškama koje se ne mogu pojedinačno eliminisati, zato što takve greške nisu predvidljive. To prouzrokuje postojanje neodređenosti u merenju.

2.2.1 Definicije termina povezanih sa grafikom transfera

Grafik transfera je grafik na kome je prikazan sirovi autput senzora u funkciji merene veličine iznad projektovanog opsega senzora. Podaci za grafik su uvek dobijeni pri statičkim uslovima.

Opseg. Merni interval za koji je senzor dizajniran da dâ odgovor naziva se opseg. Za senzor za pritisak, opseg može biti od 700 mb do 1100 mb.

Raspon. Algebarska razlika između najveće i najmanje vrednosti opsega se zove raspon. Ako je opseg od 700 mb do 1100 mb, raspon je 400 mb.

Statička osetljivost. Statička osetljivost je nagib krive transfera,

$$S_s \equiv \frac{d(\text{sirovi autput})}{d(\text{input})}.$$

Ako je ova kriva prava linija, osetljivost je konstantna duž opsega instrumenta, S_s = constant. Ako kriva transfera nije prava linija, osetljivost se menja duž

opsega senzora i tada se kaže da je senzor nelinearan. Idealni senzor treba da ima veliku i konstantnu statičku osetljivost, ili približno takvu u celom željenom opsegu. Dizajn senzora ili sistema za beleženje podataka često uključuje mikroprocesor i na taj način olakšava ispravljanje male nelinearnosti. senzor čija je osetljivost nula je beskoristan senzor. Primer za to bi mogao da bude korišćenje cigle kao senzora za pritisak. Pošto ne postoji fizička promena u cigli koja može biti detektovana pri promeni pritiska, njena osetljivost je nula i ona je beskoristan senzor za pritisak.

Rezolucija. Najmanja promena primarnog inputa koja izaziva promenu u autputu koju je moguće detektovati zove se rezolucija senzora. Rezolucija je ograničena trenjem koje sprečava odgovor i šumom koji ga maskira. Najbolja moguća rezolucija za instrument je nula.

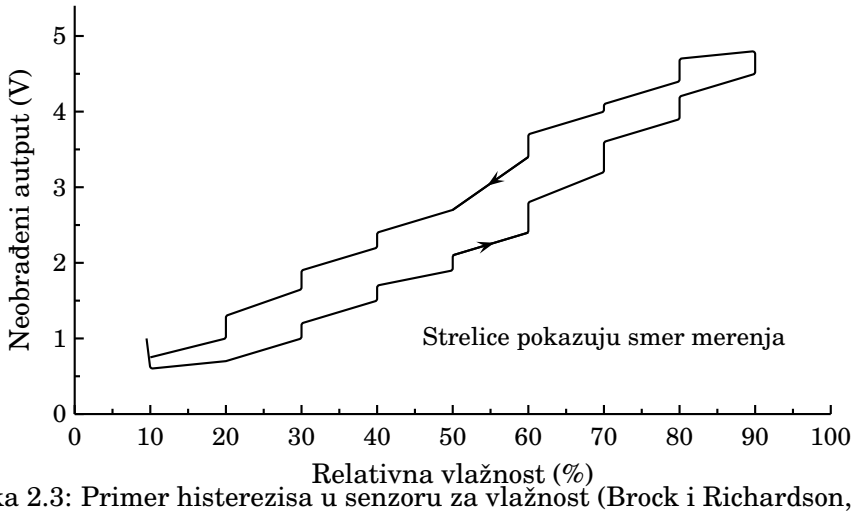
Linearnost. Ako prava linija može biti fitovana podacima grafika transfera tako da su rezidualne greške, tj. razlike između tačaka podataka i fitovane prave linije, slučajno rasute oko linije, kao na slici 2.2(a), tada se za senzor kaže da je linearan. Mala nelinearnost koja stvara sistematska odstupanja od prave linije koja su u granicama specificirane tačnosti instrumenta se obično ignorišu, na račun smanjenja tačnosti. Velika sistematska odstupanja koja ne mogu da budu ignorisana ukazuju na postojanje značajne nelinearnosti. Prava linija se obično dobija pomoću metoda najmanjih kvadrata. Za instrument se kaže da je linearan ako su greške zbog nelinearnosti dovoljno male da budu prihvatljive u granicama zahtevane specificirane tačnosti.

Histerezis. Histerezis postoji kada autput senzora za dati input zavisi od toga da li je input rastao ili opadao. To može da bude nelinearni efekat izazvan mehaničkim trenjem u nekim senzorima. Aneroidni barometar i mnogi senzori za vlažnost pokazuju histerezis. Na slici 2.3 prikazan je grafik transfera senzora za vlažnost koji prati različit hod za rastući input u odnosu na opadajući input, čak i kada se input menja vrlo sporo.

Prag. Prag je poseban slučaj histerezisa koji se javlja u nekim instrumentima kada je input na ili oko nule. Ako autput ostaje na nuli dok input sporo raste, postoji efekat praga i vrednost praga je vrednost inputa pri kojoj autput počinje da se menja. Kao i hesterezis, prag je obično prouzrokovan statičkim trenjem.

Stabilnost. Instrument je stabilan i bez drifta ako ponovljena kalibracija posle nekog perioda vremena reprodukuje krivu transfera. Ovaj vremenski period se može menjati od dana do meseca ili godina, u zavisnosti o kom se senzoru radi.

Slučajna greška ili šum. Posle podešavanja modela prema podacima (prava linija je najjednostavniji slučaj) preostala greška se naziva rezidualna greška. Ako ova greška nije sistematska, naziva se slučajna greška ili šum. Greška izazvana šumom može da bude predviđena samo u statističkom smislu i ne može da bude popravljena. Iz perspektive instrumenta, šum je deo izlaznog signala koji nije nastao od ulaznog signala. Šum nastaje zbog sekundarnih inputa, zbog interakcije senzora sa mernom veličinom ili zbog samog senzora. Kao primer poslednjeg, posmatrajmo običan otpornik kroz koji prolazi struja. Slučajne promene napona u otporniku (šum napona) se mogu javiti zbog kretanja ili vibriranja molekula u otporniku. Strujni vod u blizini može takođe da izazove šum.



Slika 2.3: Primer histerezisa u senzoru za vlažnost (Brock i Richardson, 2001).

Šum od 60 Hz može da nastane zbog sobne rasvete i električnih uređaja.

2.2.2 Postupak kalibracije

Postupak kalibracije započinje tačnim merenjem primarnog inputa X_i, i sirovog izlaza senzora Y_1, na N tačaka unutar projektovanog opsega senzora. X_i ima jedinice merne veličine, a jedinice Y_1 odgovaraju sirovom izlazu senzora. Izmereni podaci se crtaju i formiraju grafik transfera. Sledeći korak je podešavanje prave, ili krive ako je neophodno, izmerenim podacima, poželjno korišćenjem metoda najmanjih kvadrata. Postoje i drugi metodi, ali je metod najmanjih kvadrata opšte poznat i pogodan za ovu primenu. Cilj je da se dobije jednačina transfera koja može da bude korišćena za konverziju izmerenog autputa Y_1 u procenu poznatog inputa X_i. Idealno, jednačina transfera i kalibraciona jednačina bi mogle da se dobiju na osnovu poznavanja fizike senzora, kao u slučaju barometra sa živom ili hipsometra. U ostalim slučajevima, kao kod aneroidnog barometra, model transfera će biti polinom oblika

$$\hat{Y}_1 = a_o + a_1 X_i + a_2 X_i^2 + a_3 X_i^3 + \cdots \tag{2.1}$$

koji se u slučaju linearnog senzora svodi na

$$\hat{Y}_1 = a_o + a_1 X_i. \tag{2.2}$$

U svakom slučaju $\hat{Y}_1$ je aproksimacija za Y_1 zbog slučajnih grešaka pominjanih ranije. Moguće je dobiti tačno podešenu liniju ukoliko nije bilo neodređenosti merenja, ali će slučajne greške uvek postojati. Metod najmanjih kvadrata je postupak kojim se određuju koeficijenti a_o, a_1, itd. tako što se minimizira suma kvadrata razlika između podešene linije i izmerenih vrednosti. Ako je model transfera bio linearan, koeficijente a_1 i a_2 možemo dobiti minimiziranjem funkcije

$$E = \sum_{n=1}^{N} (a_o + a_1 X_{in} - Y_{1n})^2,$$

gde je sumiranje izvršeno za N vrednosti podataka (od $n = 1$ do $n = N$).

Ovo može da bude urađeno izjednačavanjem sledećih jednačina sa nulom:

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial a_o} &= 2\sum_{n=1}^{N}(a_o + a_1 X_{in} - Y_{1n}) = 0,\\ \frac{\partial E}{\partial a_1} &= 2\sum_{n=1}^{N}(a_o + a_1 X_{in} - Y_{1n})X_{in} = 0.\end{aligned} \tag{2.3}$$

Iz (2.3) možemo dobiti jednačine

$$\begin{aligned}a_o N + a_1 \sum_{n=1}^{N} X_{in} &= \sum_{n=1}^{N} Y_{1n},\\ a_o \sum_{n=1}^{N} X_{in} + a_1 \sum_{n=1}^{N} X_{in}^2 &= \sum_{n=1}^{N} X_{in} Y_{1n}.\end{aligned} \tag{2.4}$$

Rešenjem sistema 2.4 dobijamo koeficijente

$$\begin{aligned}a_o &= \frac{\sum Y_{1n} \sum X_{in}^2 - \sum X_{in} \sum X_{in} Y_{1n}}{\Delta},\\ a_1 &= \frac{N \sum X_{in} Y_{1n} - \sum X_{in} \sum Y_{1n}}{\Delta},\end{aligned} \tag{2.5}$$

gde je Δ determinanta sistema (2.4)

$$\Delta = N \sum X_{in}^2 - (\sum X_{in})^2.$$

Statička osetljivost podešene linije je $S = a_1$, a a_o je odsečak ordinate. Na slici 2.2(a) prikazan je primer podešavanja linearnog modela, datog jednačinom (2.2), setu podataka. Podaci su očigledno slučajno rasuti oko fitovane linije, što pokazuje da je modelovani senzor zaista linearan (ili je to vrlo približno). Vertikalno rastojanje između ucrtanog podatka Y_{1n} i linije je $Y_{1n} - \hat{Y}_{1n}$.

Kada je senzor nelinearan, kao na slici 2.2(b) i (c), još uvek postoji mogućnost da se podesi linearni model, linija (b) ili nelinearni model, linija (c). Nelinearni model može da bude komplikovaniji, posebno kada merni sistem ne uključuje kompjuter, ali je njegova prednost što su rezultujuće greške ili odstupanja od modela manja za liniju (c) nego za liniju (b).

Sledeći korak je da se polinomom odredi ***kalibraciona jednačina***

$$X_1 = c_o + c_1 Y_1 + c_2 Y_1^2 + c_3 Y_1^3 + \cdots \tag{2.6}$$

ili u linearnom obliku

$$X_1 = c_o + c_1 Y_1, \tag{2.7}$$

gde je X_1 najbolja procena tačne ali nepoznate vrednosti inputa X_i. Koeficijenti c mogu da se izračunaju iz koeficijenata a kao

$$\begin{aligned}c_o &= -\frac{a_o}{a_1},\\ c_1 &= \frac{1}{a_1},\end{aligned}$$

iako bi bilo bolje da se oni izračunaju korišćenjem metoda najmanjih kvadrata, slično postupku koji je prethodno opisan. Jedinice za X_1 su iste kao za X_i. Autput senzora možemo da obeležimo sa Y_1, ako posmatramo sirovi izlaz, ili sa X_1 ako želimo da posmatramo autput posle primene kalibracione jednačine (2.7). Indeks 1 se koristi za označavanje autputa senzora; autputi narednih elemenata u lancu mernog sistema, koji je opisan u uvodnom poglavlju, biće obeleženi sa X_2, X_3, itd.

2.2.2.1 Bias (procena sistematske greške), nepreciznost i netačnost

Kalibrisani autput svakog merenja $X_1 = c_o + c_1 Y_1$ se može izračunati i može biti definisana ***instrumentalna greška***

$$\varepsilon_n \equiv X_{1n} - X_{in} \tag{2.8}$$

koja je prikazana na levoj strani slike 2.4. Duga vertikalna linija na desnoj strani te slike označava srednju vrednost. Horizontalna linija pokazuje širinu raspodele, tzv. standardnu devijaciju. Gausova raspodela je data jednačinom

$$w(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \tag{2.9}$$

μ je srednja vrednost populacije, σ je standardna devijacija populacije i $w(x)$ je verovatnoća osmatranja date vrednosti x. Populaciju x-ova čine sve vrednosti koje mogu biti realizovane dok jedan uzorak x-a čini samo aktuelno izmerena vrednost.

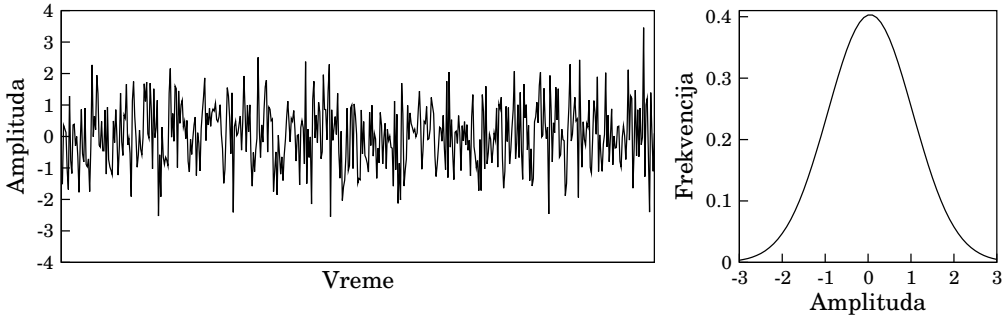
Ako je model odgovarajući, srednja vrednost i standardna devijacija grešaka su date izrazima

$$\begin{aligned} &\overline{\varepsilon} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \varepsilon_n \\ &\text{i} \\ &S_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{n=1}^{N} (\varepsilon_n - \overline{\varepsilon})^2}. \end{aligned} \tag{2.10}$$

Posle kalibracije srednja greška treba da bude jednaka nuli. Standardna devijacija je mera rasipanja i, ako su greške raspodeljene po Gausovoj raspodeli, tada će se 95 % grešaka nalaziti u prostoru širine dve standardne devijacije od srednje vrednosti (66 % grešaka su unutar jedne standardne devijacije oko srednje vrednosti). Prema tome, mogu se definisati

$$\begin{aligned} &\text{Bias} \equiv \overline{\varepsilon}, \\ &\text{Nepreciznost} \equiv 2S_\varepsilon \text{ i} \\ &\text{Netačnost} \equiv \text{Bias} \pm \text{Nepreciznost} = \overline{\varepsilon} \pm 2S_\varepsilon. \end{aligned} \tag{2.11}$$

Nepreciznost ili neodređenost je mera šuma ili rasipanja u merenju i bias je sistematska greška. Svrha statičke kalibracije je uklanjanje bias-a i numeričko



Slika 2.4: Uzorak gausovski raspodeljenog signala na levoj strani i odgovarajuća Gausova raspodela na desnoj strani (Brock i Richardson, 2001).

definisanje nepreciznosti. Međutim, bias može još uvek da bude prisutan u instrumentu, ukoliko su se karakteristike instrumenta promenile u odnosu na poslednju kalibraciju. Drugi razlog za pojavu netačnosti su sekundarni inputi u slučaju kada ne postoji odgovarajuća kompenzacija (npr. kada je aneroidni barometar osetljiv na promenu temperature i kada to nije uzeto u obzir pri kalibraciji).

Pored prethodno definisanih termina često se koristi koren srednjeg kvadrata greške (RMS)

$$RMS \equiv \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\varepsilon_n^2}, \tag{2.12}$$

i on je veoma sličan standardnoj devijaciji greške S_ε.

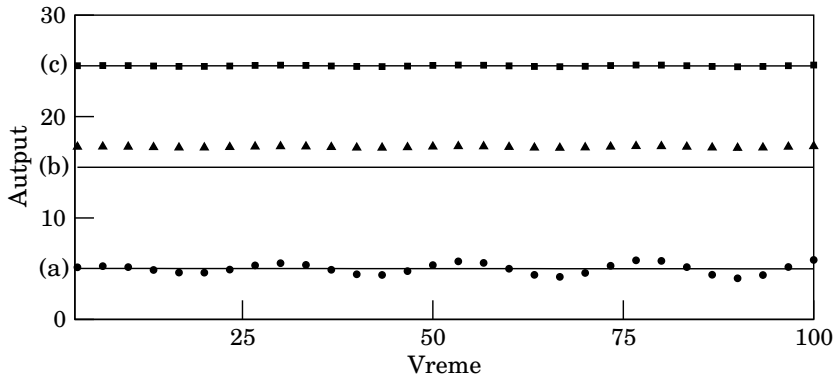
Na slici 2.5 prikazano je nekoliko primera senzora za bias-om i nepreciznošću. Svaki panel prikazuje vremensku seriju podataka gde je input imao konstantnu vrednost i prikazan je punom linijom u sredini svakog crteža. U panelu (a) bias je očigledno nula, ali je nepreciznost velika. U panelu (b) nepreciznost je mnogo manja, ali postoji značajan bias. Panel (c) prikazuje najbolji senzor; on nema bias i ima malu nepreciznost. Senzor u panelu (c) ima najmanju netačnost.

Treba naglasiti da se navedene definicije ne primenjuju svuda. Postoji značajna nepreciznost pri uobičajenom korišćenju ovih termina, posebno termina tačnost i rezolucija.

2.2.3 Primer izvođenja statičke kalibracije

Senzor za pritisak treba da bude kalibrisan u opsegu od 80 do 100 kPa. Zbog jednostavnosti, pretpostavićemo da ne postoji temperaturna osetljivost senzora. U prvoj koloni u tabeli 2.1 prikazan je input X_i u kPa, određen korišćenjem mnogo preciznijeg senzora. U drugoj koloni je prikazan sirovi autput Y_1 u voltima. Podaci u preostale dve kolone predstavljaju rezultate izračunavanja, koje je prikazano u tekstu koji sledi.

Korak 1. Postoji $N = 13$ parova podataka (X_{i1}, Y_{11}), (X_{i2}, Y_{12}), ..., (X_{in}, Y_{1n}), ..., (X_{iN}, Y_{1N}), i oni su dati u prve dve kolone tabele. Za određivanje koeficijenata a_o, a_1, c_o, c_1 treba izračunati potrebne sume. Njihove vrednosti su



Slika 2.5: Bias i nepreciznost senzora. Senzor u panelu (a) nema bias i ima veliku nepreciznost; senzor u (b) je precizniji, ali ima veći bias i senzor u (c) nema bias i ima veoma malu nepreciznost (Brock i Richardson, 2001).

Tabela 2.1: Kalibracioni podaci za senzor za pritisak.

Input X_i (kPa)	Sirovi autput Y_1 (V)	Kalibrisani autput X_1 (kPa)	greška ε (Pa)
80.000	3.0033	80.038	38
82.500	3.4949	82.495	-5
85.000	3.9882	84.961	-39
87.500	4.4937	87.487	-13
90.000	5.0049	90.042	42
92.500	5.5004	92.518	18
95.000	6.0055	95.042	42
97.500	6.4839	97.433	-67
100.000	6.9801	99.913	-87
102.500	7.5008	102.515	15
105.000	7.9971	104.995	-5
107.500	8.5061	107.539	39
110.000	9.0029	110.022	22

$\sum X_{in} = 1235.0000$, $\sum X_{in}^2 = 118462.50$, $\sum Y_{1n} = 77.961800$, $\sum Y_{1n}^2 = 513.08698$ i $\sum X_{in}Y_{1n} = 7633.9819$. Kako su potrebne sume veoma veliki brojevi, posebno za veliko N, ako koeficijenate računamo kompjuterskim programom, poželjno je da operandi u aritmetičkim operacijama imaju tip dvostruke preciznosti.

Korak 2. Ako koristimo linearni model, dobićemo da je $a_o = -13.012206$ i $a_1 = 0.20009756$, odnosno jednačinu transfera $\hat{Y}_1 = -13.012206 + 0.20009756X_i$. Statička osetljivost je a_1.

Korak 3. Koeficijenti linearne kalibracione jednačine su

$$\begin{aligned} c_o &= \frac{\sum X_{in} \sum Y_{1n}^2 - \sum Y_{1n} \sum X_{in}Y_{1n}}{\Delta_c} = 65.029877, \\ c_1 &= \frac{N \sum X_{in}Y_{1n} - \sum X_{in} \sum Y_{1n}}{\Delta_c} = 4.9974666, \\ \Delta_c &= N \sum Y_{1n}^2 - (\sum Y_{1n})^2 = 592.08850. \end{aligned} \tag{2.13}$$

Korak 4. Koristeći kalibracionu jednačinu $X_1 = c_o + c_1 Y_1$, dobijamo vrednosti date u koloni 3. Instrumentalna greška, $\varepsilon_n = X_{1n} - X_{in}$, prikazana je u koloni 4.

Korak 5. Izračunamo sumu $\sum \varepsilon_n = -1.1444092 \times 10^{-4}$ (odavde je $\varepsilon_n = \frac{1}{N} \sum \varepsilon_n = -8.8031475 \times 10^{-6}$) i sumu $\sum (\varepsilon_n - \overline{\varepsilon})^2 = 2.1403905 \cdot 10^{-2}$.

Korak 6. Prema formulama (2.10) srednja vrednost i standardna devijacija grešaka datih u četvrtoj koloni tabele su $\overline{\varepsilon} = -8.8031475 \times 10^{-6}$ i $S_\varepsilon = 4.2233385 \times 10^{-2}$.

Prema tome bias je jednak $-8.8031475 \times 10^{-6}$ kPa i nepreciznost 8.4466770×10^{-2} kPa. Ako bi kalibrisani autput senzora imao vrednost 104.544 kPa, mogli bi da procenimo da je tačna vrednost merene veličine u intervalu između $104.544 - 0.084 = 104.460$ kPa i $104.544 + 0.084 = 104.628$ kPa. Ne postoji opravdanje za izražavanje autputa sa šest značajnih cifara jer je neodređenost na četvrtoj cifri. U ovom slučaju bi bilo pogodno da se autput zapiše kao 104.5 kPa. Sa prihvatljivim izborom značajnih cifara bias je 0.0 Pa i nepreciznost 84 Pa. Koristeći statičku osetljivost od 0.20009756 V(kPa)$^{-1}$ možemo da konvertujemo nepreciznost kalibrisanog autputa od 84 Pa u nepreciznost sirovog autputa od 84 Pa $\times$ 0.20009756 V(kPa)$^{-1}$ = 17 mV. Ovo ukazuje da sirovi autput treba da merimo sa tačnošću do oko 10 mV i da poslednje dve cifre u koloni dva tabele nisu značajne.

Glava 3

Merenje temperature

Temperatura je fizička veličina koja karakteriše srednje slučajno kretanje molekula u fizičkom telu. Temperatura dva tela, koja su u termičkom kontaktu, ima tendenciju da se izjednači. Prema tome, temperatura predstavlja termodinamičko stanje tela, a njena vrednost je određena smerom prenosa toplote između dva tela. U takvom sistemu, telo koje predaje toplotu je na većoj temperaturi. Definisanje temperature kao fizičke veličine povezane sa stanjem tela je nepraktično. Umesto toga definisana je međunarodno prihvaćena temperaturna skala zasnovana na univerzalnim tačkama mržnjenja i trojnim tačkama. Trenutno je važeća internacionalna temperaturna skala, ITS-90, iz 1990. Za meteorološki opseg (od -80 do +60°C) ta skala je zasnovana na linearnoj vezi sa električnim otporom platine i trojnoj tački vode, koja je definisana kao 273.16 stepeni po Kelvinovoj skali. Za meteorološke potrebe temperatura se meri u različitim sredinama. Najčešće se meri temperatura vazduha, na različitim visinama, zatim temperatura pri tlu, temperatura tla na različitim dubinama, minimalna temperatura trave i temperatura mora. Prema Svetskoj meteorološkoj organizaciji (WMO, 1992), temperatura vazduha je definisana kao temperatura koju pokazuje termometar koji se nalazi u vazduhu na mestu zaklonjenom od direktnog sunčevog zračenja.

3.0.4 Jedinice i skale

Termodinamička (ili Kelvinova) temperatura, T, u jedinicama kelvin, K, je osnovna temperatura. Kelvin je 1/273.16 deo termodinamičke temperature trojne tačke vode. Za većinu meteoroloških namena najčešće se koristi temperatura, t, u stepenima Celzijusa, °C definisana kao

$$t(^\circ\mathrm{C}) = T(K) - 273.15. \tag{3.1}$$

Vrednost razlike temperature je ista u kelvinima i u celzijusima. U anglosaksonskim zemljama se često koristi i Farenhajtova skala, čija je jedinica farenhajt, F. Temperatura u farenhajtima je definisana kao

$$\begin{aligned} t(^\circ\mathrm{C}) &= \frac{5}{9}(t(^\circ\mathrm{F}) - 32), \\ t(^\circ\mathrm{F}) &= \frac{9}{5}t(^\circ\mathrm{C}) + 32 \end{aligned} \tag{3.2}$$

U Farenhajtovoj skali tačka mržnjenja vode je na 32°F a tačka ključanja (na standardnom pritisku p_0 = 1013.15 mb) na 212°F. Jedan stepen Farenhajtove skale je 1/180 deo intervala između tačke mržnjenja i tačke ključanja. U Celzijusovoj skali ovaj interval je 100 stepeni, tako da je interval temperature od 1°F jednak $\frac{100}{180} = \frac{5}{9}$°C. Apsolutna nula je na −459.67°F, a Farenhajtova skala se podudara sa Celzijusovom na -40 stepeni. Postoji i Rankinova skala, kod koje je veličina stepena kao kod Farenhajtove ali je apsolutna nula na 0°R. U termodinamičkoj skali temperature, merenja su izražena kao razlika u odnosu na apsolutnu nulu (0 K), koja je definisana kao temperatura na kojoj molekuli bilo koje supstance ne poseduju kinetičku energiju. Skala temperature u najopštijoj upotrebi od 1990. je ITS-90, i zasnovana je na označenim vrednostima za temperature jednog broja ravnotežnih stanja, koje se mogu reprodukovati i na specifičnim standardnim instrumentima koji su kalibrisani na ovim temperaturama. ITS skala je izabrana tako da su izmerene vrednosti identične sa termodinamičkom temperaturom. Temperature od meteorološkog interesa su dobijene interpolacijom između fiksnih tačaka primenom standardnih formula. Standardni metod interpolacije između fiksnih tačaka koristi formule koje povezuju pokazivanja standardnih instrumenata i vrednosti iz ITS-90. Standardni instrument koji se koristi za temperature od -259.34 do 630.74°C je platinski otporni termometar kod koga je količnik $\frac{R_{100}}{R_0} = 1.3850$, R_{100} je otpor na 100°C i R_0 je otpor na 0°C. U intervalu od 0 do 630.74°C otpor u funkciji temperature je dat jednačinom

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2), \tag{3.3}$$

R_t je otpor platinske žice na temperaturi t, R_0 je njen otpor na 0°C, a A i B su konstante koje su određene iz merenja veličine R_t na tački ključanja vode i tački mržnjenja cinka. Od −189.3442°C do 0°C otpor u funkciji temperature se računa iz jednačine

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3), \tag{3.4}$$

R_t, R_0, A i B su određeni kao za jednačinu (3.3) i koeficijent C je određen merenjem na tački ključanja kiseonika.

3.0.5 Meteorološki zahtevi

Meteorološki zahtevi za merenjem temperature prvenstveno se odnose na:

- vazduh u blizini zemljine površine;
- površinu tla;
- slojeve u tlu;
- površinske nivoe mora i jezera;
- gornje slojeve atmosfere.

Ova merenja su potrebna za inicijalizaciju numeričkih modela za prognozu vremena, za hidrološke i poljoprivredne namene i kao indikator klimatskih promena.

3.1 Inercija termometara

Kada se termometar temperature t postavi u sredinu temperature θ, koju treba izmeriti, njegova temperatura ne može trenutno da se izjednači sa temperaturom sredine, već joj se približava brzinom koja zavisi od karakteristika termometra i osobina same sredine. Količina toplote koju termometar dobije ili preda okolini za vreme $d\tau$ je

$$dQ = -hS(t-\theta)d\tau, \tag{3.5}$$

h je koeficijent toplotne razmene, a S je površina termometra kroz koju se vrši razmena toplote. Zbog razmenjene toplote promeniće se temperatura termometra

$$dQ = cmdt, \tag{3.6}$$

m je masa, a c je specifična toplota termometarske materije. Iz jednačina (3.5) i (3.6) dobijamo

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{hS}{mc}(t-\theta) \quad \Rightarrow \quad \frac{dt}{d\tau} = -\frac{1}{\lambda}(t-\theta), \tag{3.7}$$

gde je

$$\lambda = \frac{mc}{hS}.$$

Jednačina (3.7) opisuje brzinu promene temperature termometra, odnosno brzinu kojom se temperatura termometra približava temperaturi okolne sredine. Ova brzina je obrnuto proporcionalna konstanti λ koja se naziva ***koeficijent inercije*** termometra.

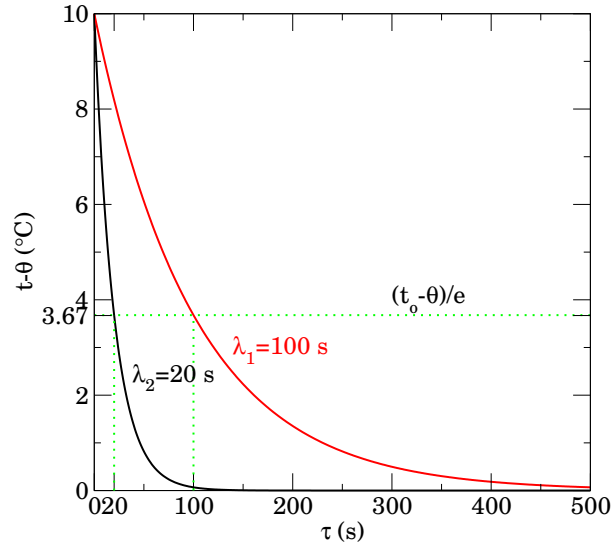
U slučaju konstantne temperature sredine ($\theta = const.$) možemo integraliti jednačinu (3.7)

$$\int_{t_o}^{t} \frac{dt}{t-\theta} = -\frac{1}{\lambda}\int_{0}^{\tau} d\tau \quad \Rightarrow \quad \frac{t-\theta}{t_o-\theta} = e^{-\frac{\tau}{\lambda}}. \tag{3.8}$$

Iz jednačine (3.8) se vidi da razlika između temperature termometra i temperature okoline brže teži nuli (temperatura termometra brže teži temperaturi sredine) pri manjoj vrednosti λ. Ako u jednačinu (3.8) stavimo da je proteklo vreme τ jednako koeficijentu inercije λ dobićemo

$$\frac{t-\theta}{t_o-\theta} = e^{-1} \quad \Rightarrow \quad \frac{t_o-\theta}{t-\theta} = e. \tag{3.9}$$

Na osnovu poslednje jednačine, možemo eksperimentalno odrediti koeficijent inercije termometra kao vreme za koje se početna razlika između temperature termometra i temperature sredine smanji e puta.



Slika 3.1: Razlika između temperature termometra, t, i konstantne temperature okolnog vazduha, θ, u funkciji vremena, za različite koeficijente inercije termometra.

PRIMER 3.1 *Temperatura sredine je* $\theta = 16°\text{C}$. *Kako možemo eksperimentalno odrediti koeficijent termičke inercije termometra?*

rešenje: *Zagrejaćemo termometar do* $t = 40°\text{C}$, *i izabraćemo proizvoljno* $t_o = 30°\text{C}$. *Na osnovu jednačine (3.9) izračunaćemo*

$$t = \theta + \frac{t_o - \theta}{e} = 16 + \frac{30-16}{e} = 21.2°\text{C}. \tag{3.10}$$

Znači, zagrejani termometar ćemo dovesti u sredinu čija je temperatura $16°\text{C}$ *i izmerićemo vreme za koje će termometar da se ohladi od* $30°\text{C}$ *do* $21.2°\text{C}$. *To vreme je brojno jednako inerciji termometra.*

PRIMER 3.2 *Odredite vreme koje je potrebno da termometar koji pokazuje temperaturu od* $30°\text{C}$ *izmeri temperaturu sredine, koja iznosi* $20°\text{C}$, *sa tačnošću od* $0.1°\text{C}$. *Koeficijent inercije termometra je* $\lambda = 100$ s.

rešenje: *Iz jednačine (3.8)*

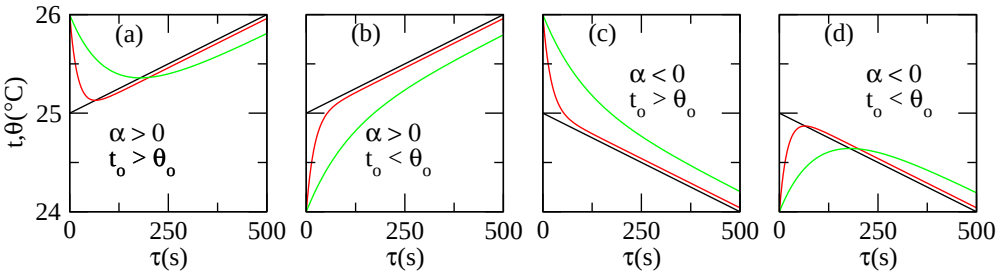
$$\tau = \lambda \ln \frac{t_0 - \theta}{t - \theta} \quad \Rightarrow \quad \tau = 100 \ln \frac{10}{0.1} = 460 \text{ s}. \tag{3.11}$$

U slučaju kada se temperatura okoline menja linearno u toku vremena, $\theta = \theta_o + \alpha\tau$, konstantnom brzinom $\alpha = \frac{d\theta}{dt} = const.$, jednačina (3.7) postaje

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{1}{\lambda}(t - \theta_o - \alpha\tau). \tag{3.12}$$

Uvođenjem nove promenljive

$$x = t - \theta_o - \alpha\tau,$$



Slika 3.2: Promena temperature termometra i temperature okolnog vazduha u funkciji vremena, za različite koeficijente inercije termometra, za $\theta_o = 25°\text{C}$, $t_o = \theta_o \pm 1°\text{C}$ i $\alpha = \pm 1/500$ s.

i njenog diferencijala

$$dx = dt - \alpha d\tau \quad \Rightarrow \quad \frac{dt}{d\tau} = \frac{dx}{d\tau} + \alpha$$

u jednačinu (3.12) dobijamo

$$\frac{dx}{x + \alpha\lambda} = -\frac{d\tau}{\lambda} \tag{3.13}$$

i nakon njenog integraljenja

$$\ln(t - \theta + \alpha\lambda) = -\frac{\tau}{\lambda} + C. \tag{3.14}$$

Na osnovu početnih uslova (za $\tau = 0 \quad \Rightarrow \quad t = t_o,\ \theta = \theta_o$) konstanta C dobija vrednost

$$C = \ln(t_o - \theta_o + \alpha\lambda). \tag{3.15}$$

Iz (3.15 i 3.14) rešenje jednačine (3.12) je

$$t - \theta = (t_o - \theta_o + \alpha\lambda)e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - \alpha\lambda \tag{3.16}$$

i predstavljeno je na slici (3.2).

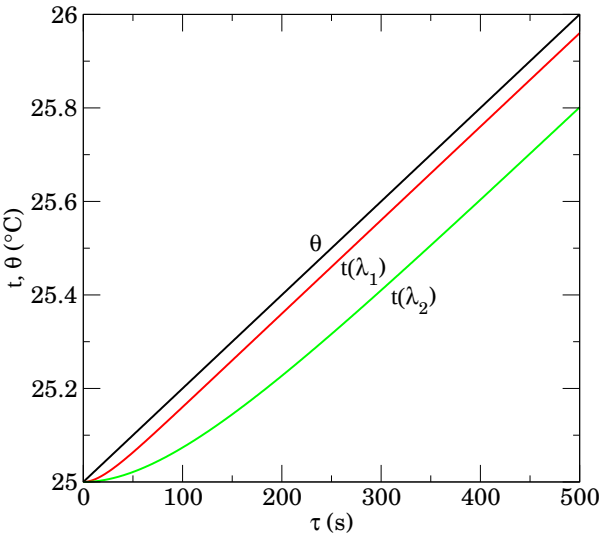
U slučaju kada je početna temperatura, t_o, jednaka temperaturi okoline, θ_o, iz (3.16) dobijamo

$$t - \theta = \alpha\lambda(e^{-\frac{\tau}{\lambda}} - 1). \tag{3.17}$$

Ovo rešenje je prikazano na slici (3.3), za različite vrednosti koeficijenata inercije. Kada je proteklo vreme mnogo veće od koeficijenta inercije, $\tau \gg \lambda$, iz (3.16) je

$$t - \theta = -\alpha\lambda, \tag{3.18}$$

u ovom slučaju razlika između temperature termometra i okolne temperature je $-\alpha\lambda$ i ne menja se sa vremenom.



Slika 3.3: Promena temperature termometra i temperature okolnog vazduha u funkciji vremena, za različite koeficijente inercije termometra, za $t_o = \theta_o = 25°\text{C}$, $\alpha = 1/500$ s, $\lambda_1 = 20$ s i $\lambda_2 = 100$ s

Često se dešava da temperatura vazduha osciluje oko neke srednje vrednosti. Ovakva oscilovanja temperature se uvek mogu sa dovoljnom tačnošću predstaviti preko Furijeovog reda

$$\theta = \theta_o + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega\tau + B_n \sin n\omega\tau, \tag{3.19}$$

θ je trenutna temperatura vazduha, θ_o je srednja vrednost temperature vazduha u nekom intervalu vremena, A_n i B_n su amplitude posebnih harmonika, $\omega = 2\pi/T$ je frekvencija i T je period oscilacija. Promena temperature vazduha će izazvati promenu temperature termometra, koju, na osnovu jednačina (3.7) i (3.19), možemo napisati kao

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{1}{\lambda}(t-\theta_o) + \frac{1}{\lambda}\sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega\tau + B_n \sin n\omega\tau. \tag{3.20}$$

Uvešćemo novu promenljivu $y = t - \theta_o$ i opšte rešenje jednačine (3.20) tražiti u obliku $y = y_1 + y_2$, y_1 je rešenje homogene jednačine $\frac{dt}{d\tau} = -\frac{1}{\lambda}(t-\theta_o)$, a y_2 partikularno rešenje jednačine (3.20). Rešenje homogene jednačine je oblika

$$y_1 = Ce^{-\frac{\tau}{\lambda}}, \tag{3.21}$$

gde je C konstanta integracije. Partikularno rešenje tražimo u obliku

$$y_2 = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega\tau + b_n \sin n\omega\tau, \tag{3.22}$$

a_n i b_n su amplitude harmonika temperaturnih oscilacija termometra. Diferencirajući po vremenu y_2 iz jednačine (3.22) i zamenom u jednačinu (3.20) dobijamo

$$\sum_{n=1}^{\infty} -na_n\omega\sin n\omega\tau + nb_n\omega\cos n\omega\tau = -\frac{1}{\lambda}\sum_{n=1}^{\infty} a_n\cos n\omega\tau + b_n\sin n\omega\tau + \frac{1}{\lambda}\sum_{n=1}^{\infty} A_n\cos n\omega\tau + B_n\sin n\omega\tau. \tag{3.23}$$

Izjednačavanje koeficijenata uz odgovarajuće harmonike daje vezu između amplituda harmonika temperaturnih oscilacija termometra i amplituda odgovarajućih harmonika temperaturnih oscilacija okolnog vazduha

$$\left.\begin{aligned} -na_n\omega &= -\frac{1}{\lambda}b_n + \frac{1}{\lambda}B_n \\ nb_n\omega &= -\frac{1}{\lambda}a_n + \frac{1}{\lambda}A_n \end{aligned}\right\} \quad \Rightarrow: \quad \begin{aligned} a_n &= \frac{A_n - B_n k_n}{1+k_n^2} \\ b_n &= \frac{A_n k_n + B_n}{1+k_n^2}, \end{aligned} \tag{3.24}$$

gde je $k_n \equiv n\omega\lambda$ relativni koeficijenat inercije termometra. Zamenom koeficijenata a_n i b_n u jednačinu (3.22), uz jednačinu (3.21), opšte rešenje jednačine (3.20) je

$$y = y_1 + y_2 \quad \Rightarrow: \quad t - \theta_o = Ce^{-\frac{\tau}{\lambda}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n - B_n k_n}{1+k_n^2}\cos n\omega\tau + \frac{A_n k_n + B_n}{1+k_n^2}\sin n\omega\tau. \tag{3.25}$$

Konstantu C određujemo iz početnog uslova ($t = t_o$ za $\tau = 0$) kao

$$C = t_o - \theta_o - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n - B_n k_n}{1+k_n^2}, \tag{3.26}$$

pa je opšte rešenje

$$t - \theta_o = (t_o - \theta_o - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n - B_n k_n}{1+k_n^2})e^{-\frac{\tau}{\lambda}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n - B_n k_n}{1+k_n^2}\cos n\omega\tau + \frac{A_n k_n + B_n}{1+k_n^2}\sin n\omega\tau. \tag{3.27}$$

Za dovoljno veliko vreme τ, prvi član na desnoj strani jednačine (3.27) možemo da zanemarimo, pa je

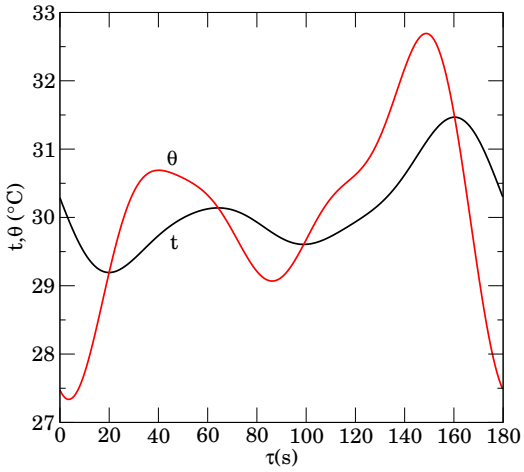
$$t - \theta_o = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n - B_n k_n}{1+k_n^2}\cos n\omega\tau + \frac{A_n k_n + B_n}{1+k_n^2}\sin n\omega\tau \tag{3.28}$$

ili, koristeći trigonometrijski identitet *

$$t - \theta_o = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\frac{A_n^2 + B_n^2}{1+k_n^2}}\cos(n\omega\tau - \operatorname{arctg}\frac{A_n k_n + B_n}{A_n - B_n k_n}). \tag{3.29}$$

Pri svakom merenju dobijamo vrednost t (vrednost koja je očitana na termometru), a istovremeno prava vrednost θ ostaje nepoznata. Posle merenja možemo

* $A\cos\alpha + B\sin\alpha = \sqrt{A^2+B^2}\cos(\alpha - \operatorname{arctg}\frac{B}{A})$



Slika 3.4: Temperatura termometra, t (izmerena temperatura), i stvarna temperatura okolnog vazduh, a θ (izračunata temperatura), u funkciji vremena za $\lambda_2 = 30$s.

razložiti u Furijeov red temperaturu termometra i dobiti koeficijente a_n i b_n. Na osnovu ovih koeficijenata, koristeći jednačinu (3.24), možemo dobiti Furijeove koeficijente za temperaturu vazduha $A_n = a_n + k_n b_n$ i $B_n = b_n - k_n a_n$ i na osnovu (3.19) temperaturu vazduha u obliku

$$\theta = \theta_o + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n + k_n b_n)\cos n\omega\tau + (b_n - k_n a_n)\sin n\omega\tau, \tag{3.30}$$

a iz jednačine (3.28)

$$t = \theta_o + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega\tau + b_n \sin n\omega\tau. \tag{3.31}$$

Ponekad je zgodnije napisati jednačine (3.30) i (3.31), korišćenjem identiteta * u obliku

$$\theta = \theta_o + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{(1+k_n^2)(a_n^2+b_n^2)}\cos(n\omega\tau - \varphi_n), \quad \varphi_n = \operatorname{arctg}\frac{b_n - a_n k_n}{a_n + b_n k_n}, \tag{3.32}$$

i

$$t = \theta_o + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{a_n^2+b_n^2}\cos(n\omega\tau - \psi_n), \quad \psi_n = \operatorname{arctg}\frac{b_n}{a_n}. \tag{3.33}$$

Harmonici temperaturnih oscilacija termometra su pomereni po fazi, u odnosu na harmonike temperaturnih oscilacija vazduha, za ugao

$$\phi_n = \varphi_n - \psi_n, \tag{3.34}$$

a njihova amplituda je za $\sqrt{1+k_n^2}$ manja.

PRIMER 3.3 *Vrednosti temperature izmerene su termometrom aspiracionog psihrometra. Koeficijent inercije ovog termometra je* $\lambda = 30$ s *pri uključenom aspiratoru. Na osnovu tih vrednosti treba odrediti stvarnu vrednost temperature vazduha u trenutku merenja.*

rešenje: *Rezultati merenja u toku intervala od* $T = 180$ s*, mogu biti predstavljeni sumom*

$$\begin{aligned} t = {} & 30.1 + 0.28\cos\omega\tau - 0.458\sin\omega\tau - 0.071\cos 2\omega\tau - 0.648\sin 2\omega\tau \\ & + 0.015\cos 3\omega\tau - 0.204\sin 3\omega\tau - 0.038\cos 4\omega\tau - 0.08\sin 4\omega\tau. \end{aligned} \tag{3.35}$$

Kada se odgovarajući koeficijenti uvrste u jednačinu (3.30), dobija se izraz za stvarnu temperaturu vazduha

$$\begin{aligned} \theta = {} & 30.1 - 0.200\cos\omega\tau - 0.751\sin\omega\tau - 1.428\cos 2\omega\tau - 0.499\sin 2\omega\tau \\ & - 0.626\cos 3\omega\tau - 0.251\sin 3\omega\tau - 0.373\cos 4\omega\tau + 0.079\sin 4\omega\tau. \end{aligned} \tag{3.36}$$

Ove vrednosti su predstavljene na slici (3.4).

3.2 Senzori za temperaturu

Senzori za temperaturu koriste različite fizičke principe: termalno širenje, termoelektricitet, električni otpor, električni kapacitet i neke druge. Kod instrumenata sa direktnim pokazivanjem, kao što su bimetalne trake ili termometri sa tečnošću, sirovi izlazni signal je promena položaja senzora. Kod instrumenata koji imaju senzor dizajniran za rad sa data logerom izlazni signal se obično konvertuje u električni napon. Takav izlazni signal je pogodan za digitalizaciju i može se po potrebi pojačati do željene vrednosti.

3.2.1 Termalno širenje

Osobina termalnog širenja se koristi za merenje temperature u termometrima u obliku bimetalnih traka i termometrima sa tečnošću. U oba slučaja se koristi razlika koeficijenata širenja različitih materijala. Linearno širenje je dato izrazom

$$\Delta L = \alpha L_o \Delta T, \tag{3.37}$$

ΔL je promena dužine pri promeni temperature za ΔT u odnosu na referentnu temperaturu, α je koeficijent linearnog širenja i L_o je dužina na referentnoj temperaturi. Zapreminsko širenje je

$$\Delta V = \beta V_o \Delta T, \tag{3.38}$$

β je koeficijent zapreminskog širenja i V_o je zapremina kada je $\Delta T = 0$.

3.2.1.1 Termometri sa tečnošću

Termometar sa tečnošću ima oblik staklene cevi koja je proširena na jednom kraju a sužena u obliku kapilare u mnogo dužem preostalom delu. Proširenje (rezervoar) i deo kapilare su ispunjeni termometarskom tečnošću. Na termometru

Tabela 3.1: Karakteristike nekih termometarskih tečnosti. (T_F - temperatura topljenja, T_B - temperatura ključanja, β - koeficijent zapreminskog širenja, c - specifični toplotni kapacitet, k - toplotna provodljivost, kv - da li tečnost kvasi staklo).

termometarska tečnost	T_F(°C)	T_B(°C)	$\beta(\mathrm{K}^{-1})$	$c(\mathrm{JK}^{-1}\mathrm{g}^{-1})$	$k(\mathrm{Wm}^{-1}\mathrm{K}^{-1})$	kv
živa	-38.9	336.9	0.000181	0.12	8.3610	ne
etanol	-117.3	78.5	0.00110	2.43	0.1800	da
toluol	-95.1	110.5	0.00109	1.51	0.1591	da

se nalazi skala, koja je pričvršćena za cev ili je ugravirana na njoj. U prostoru iznad tečnosti u kapilari se nalazi samo para termometarske tečnosti. Kako se temperatura instrumenta menja, zapremina termometarske tečnosti u rezervoaru se menja mnogo više od zapremine stakla i prouzrokuje promenu visine stuba tečnosti u kapilari:

$$\Delta V_d = \beta_d V_o \Delta T = \pi r^2 \Delta h, \tag{3.39}$$

$\beta_d = \beta_{tf} - \beta_g$ je razlika zapreminskih koeficijenata termalnog širenja termometarske tečnosti i stakla [†], r je poluprečnik kapilare i Δh je promena visine stuba termometarske tečnosti. Širenje termometarske tečnosti koja se nalazi u kapilari se zbog male zapremine u odnosu na zapreminu rezervoara obično zanemaruje. Statička osetljivost (definisana na strani 16) termometra sa tečnošću je

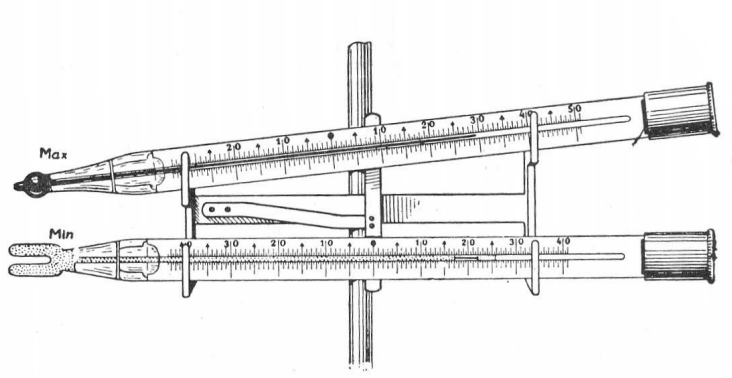
$$S = \frac{dh}{dT} = \frac{\beta_d V_o}{\pi r^2}. \tag{3.40}$$

Veću osetljivost ima termometar sa većim rezervoarom i manjim poluprečnikom kapilare. Takođe, termometar sa užom kapilarom je manje osetljiv na grešku koja bi mogla da nastane ukoliko bi se deo stuba termometarske tečnosti nalazio iznad imerzione linije [‡]. Kod termometara sa kompletnom imerzijom, kao što je slučaj kod merenja temperature vazduha, greške ovakvog tipa ne postoje. Najčešće korišćene termometarske tečnosti su živa, alkohol (etanol) i toluol. Neke karakteristike tih tečnosti su prikazane u tabeli 3.1.

PRIMER 3.4 *Termometar sa živom ima rezervoar zapremine* 150 mm^3 *i kapilarnu cev dužine* 15 cm *i prečnika* 0.1 mm*. Zapremina kapilare je* 1.178 mm^3*; prema tome, čak i kada bi kapilara bila potpuno ispunjena živom, sadržala bi svega* 0.8% *od ukupne zapremine od* 151.178 mm^3*, dok bi rezervoar sadržao* 99.2% *ukupne zapremine.*

[†]Zapreminski koeficijent termalnog širenja žive je $\beta_{H_g} = 0.000181$, a stakla $\beta_g = 0.0000253$ (za staklo koje je sastavljeno od 67.5% SiO_2, 2.5% Al_2O_3, 2.0% B_2O_3, 7.0% CaO, 7.0% ZnO i 14.0% Na_2O).

[‡]Termometri sa tečnošću se, na osnovu toga u kojoj meri se potapaju u sredinu čija se temperatura meri, mogu klasifikovati na termometre sa kompletnom, potpunom i parcijalnom imerzijom. Termometri sa kompletnom imerzijom se pri merenju kompletno nalaze u sredini. Kod termometara sa potpunom imerzijom u sredini se nalaze rezervoar i deo kapilare koji je popunjen termometarskim fluidom. Kod termometara sa parcijalnom imerzijom u sredini treba da bude rezervoar i mali deo stuba termometarske tečnosti do obeležene horizontalne linije koja se naziva imerziona linija.



Slika 3.5: Maksimalni i minimalni termometar (SHMZ, 1974).

PRIMER 3.5 *Statička osetljivost kod termometra u prethodnom primeru je*

$$S = \frac{150 \times 1.6 \times 10^{-4}}{\pi (0.05)^2} = 3.06 \text{ mmK}^{-1},$$

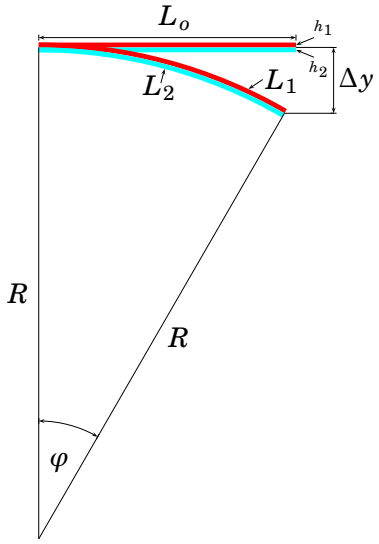
tako da bi se u slučaju porasta temperature za 1 K *visina stuba žive u kapilari povećala za* 3.06 mm*. Mogli bi na cevi termometra da obeležimo jednostepene oznake na svakih* 3.06 mm*. Merni raspon termometra bi u tom slučaju bio* $\frac{150}{3.06} =$ 49 *stepeni. Ako bi ostavili nešto mesta za margine raspon bi mogao da bude* 40°C*, na primer od* 0°C *do* 40°C*.*

U meteorologiji je u upotrebi više tipova termometara sa tečnošću:

3.2.1.1.1 Obični (stanični) termometar To je najtačniji od svih standardnih meteoroloških termometara i obično je živin termometar. Podeoci na skali su ucrtani na svakih 0.2 K ili 0.5 K i skala je duža nego kod ostalih meteoroloških termometara. Stanični termometar je smešten u meteorološkom zaklonu radi zaštite od zračenja. Termometar se montira vertikalno sa rezervoarom na donjem kraju. Rezervoar je cilindričan ili u obliku glavice luka. Dva stanična termometra, od kojih je rezervoar jednog od njih omotan mokrom krpicom, mogu da se koriste za merenje vlažnosti vazduha (psihrometar).

3.2.1.1.2 Maksimalni termometar Maksimalni termometar je živin termometar i ima suženu kapilaru u delu iznad rezervoara. Kada temperatura raste živa se probija kroz suženje, a kada temperatura opada suženje sprečava živu da se vrati u rezervoar i živin stub se prekida na suženju. Položaj preostalog dela živinog stuba iznad suženja pokazuje maksimalnu temperaturu. Da ne bi došlo do vraćanja žive u rezervoar zbog sile zemljine teže maksimalni termometar se montira pod uglom od oko 2° u odnosu na horizont, sa rezervoarom na donjem kraju.

3.2.1.1.3 Minimalni termometar U kapilari ovog termometra, u termometarskoj tečnosti, nalazi se pokretni stubić od tamnog stakla, dužine oko 2 cm. Radni položaj minimalnog termometra je skoro horizontalan. Kada temperatura



Slika 3.6: Šematski prikaz principa rada bimetalne trake.

raste termometarska tečnost se širi i teče oko stubića koji ostaje fiksiran na jednom mestu. Kada temperatura opada površinski napon u menisku tečnosti ne dozvoljava stubiću da izađe iz njega i pomera ga ka nižim temperaturama. Sila trenja koja deluje na stubić duž kapilare mora da bude manja od sile koja je potrebna za prekidanje površine meniska. U minimalnim termometrima se koristi neka od sledećih termometarskih tečnosti: etanol (C_2H_5OH), pentan[§] (C_5H_{12}) ili toluol ($C_6H_5CH_3$). Posebno je važno da termometarske tečnosti budu što je moguće čistije, jer prisustvo nečistoća povećava njihovu sklonost ka polimerizaciji pod dejstvom sunčeve svetlosti.

3.2.1.1.4 Termometri za merenje temperature zemljišta Temperatura zemljišta je potrebna za računanje toplotnog bilansa zemljišta i prizemnog sloja vazduha. Na meteorološkim stanicama temperatura zemljišta se meri pomoću posebnih živinih, alkoholnih i električnih termometara. Od živinih geotermometara koriste se kolenasti i izvlačeći. Standardne dubine na kojima se meri temperatura zemljišta su 5, 10, 20, 50 i 100 cm.

3.2.1.2 Bimetalne trake

Bimetalnu traku čine dve trake spojene jednom površinom, napravljene od metala sa različitim koeficijentima termalnog širenja. Ako je jedna strana bimetalne trake fiksirana, druga slobodna strana će se pri zagrevanju savijati ka strani trake koja ima manji koeficijent termalnog širenja. Intenzitet otklona slobodne strane bimetalnog senzora je funkcija temperature.

Na slici 3.6 je prikazana bimetalna traka sastavljena od dve metalne komponente debljina h_1 i h_2. Pretpostavićemo da bimetalna traka nije zakrivljena na temperaturi T_o i da je njena dužina tada L_o. Pretpostavićemo, takođe, da je na temperaturi T bimetalna traka kružno zakrivljena sa poluprečnikom krivine R

[§]Tačka ključanja 36.07°C, tačka mržnjenja −129.7°C, kvasi staklo.

i da je njen slobodni kraj pomeren za Δy. Poluprečnik krivine spoljne površine gornje trake je tada $R+h_1$, a donje $R-h_2$. Tada su dužine traka date izrazima

$$\begin{aligned} L_1 &= (R+h_1)\varphi \\ L_2 &= (R-h_2)\varphi, \end{aligned} \tag{3.41}$$

a odavde dobijamo

$$\varphi = \frac{L_1 - L_2}{h_1 + h_2}. \tag{3.42}$$

Dužine bimetalnih komponenata na temperaturi T su, prema jednačini (3.37), jednake

$$\begin{aligned} L_1 &= L_o[1+\alpha_1(T-T_o)] \\ L_2 &= L_o[1+\alpha_2(T-T_o)], \end{aligned} \tag{3.43}$$

α_1 i α_2 su koeficijenti linearnog termalnog širenja bimetalnih komponenata. Zamenom izraza (3.43) u (3.42) dobijamo

$$\varphi = \frac{L_o(\alpha_1 - \alpha_2)(T-T_o)}{h_1+h_2}. \tag{3.44}$$

Promena položaja slobodnog kraja bimetalne trake u pravcu upravnom na početni položaj može da se napiše kao

$$\Delta y = R - R\cos\varphi. \tag{3.45}$$

Ako iskoristimo trigonometrijsku relaciju

$$1-\cos\varphi = 2\sin^2\frac{\varphi}{2}$$

i činjenicu da je φ relativno malo, pa je $\sin^2\frac{\varphi}{2} = (\frac{\varphi}{2})^2$, jednačinu (3.45) možemo napisati u obliku

$$\Delta y = 2R\sin^2\frac{\varphi}{2} = \frac{R\varphi^2}{2}. \tag{3.46}$$

Ugao φ možemo da napišemo i kao

$$\varphi = \frac{(L_1+L_2)/2}{R} = \frac{L_o}{R} + \frac{L_o(\alpha_1+\alpha_2)(T-T_o)}{2R} \approx \frac{L_o}{R}, \tag{3.47}$$

pa je

$$\Delta y \approx \frac{L_o\varphi}{2},$$

odnosno, uz jednačinu (3.44)

$$\Delta y \approx \frac{L_o^2(\alpha_1-\alpha_2)}{2(h_1+h_2)}(T-T_o). \tag{3.48}$$

Tabela 3.2: Koeficijenti linearnog i zapreminskog širenja različitih materijala.

materijal	linearno širenje α (K^{-1})	zapreminsko širenje β (K^{-1})
aluminijum	2.4×10^{-5}	7.2×10^{-5}
mesing	2.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}
bakar	1.7×10^{-5}	5.1×10^{-5}
staklo	0.4 do 0.9×10^{-5}	1.2 do 2.7×10^{-5}
čelik	1.2×10^{-5}	3.6×10^{-5}
invar ¶	0.09×10^{-5}	0.27×10^{-5}
kvarc	0.04×10^{-5}	0.12×10^{-5}

Za datu bimetalnu traku $A \equiv \frac{L_o^2(\alpha_1-\alpha_2)}{2(h_1+h_2)}$ je konstanta, pa je pomeranje slobodnog kraja bimetalne trake približno linearna funkcija promene temperature

$$\Delta y \approx A \cdot (T - T_o). \tag{3.49}$$

Statička osetljivost bimetalnog senzora je

$$S = \frac{d(\Delta y)}{d(T - T_o)} = A \tag{3.50}$$

i proporcionalna je kvadratu dužine i razlici koeficijenata linearnog termalnog širenja komponenata bimetalne trake, a obrnuto proporcionalna njenoj debljini. Prema tome, bimetalna traka je linearni senzor, jer je njena statička osetljivost konstantna.

3.2.1.2.1 Mehanički termografi su instrumenti koji služe za kontinuarno merenje i beleženje izmerene temperature. Imaju senzore u obliku bimetalnih prstenova ili Burdonove (Bourdon) cevi[||]. Bimetalni prsten je jednom stranom pričvršćen za kućište termografa, a druga slobodna strana je preko sistema poluga povezana sa perom pisača. Pero ostavlja trag na traci pričvršćenoj za doboš koji rotira konstantnom brzinom. Termografi bi trebalo da imaju merni raspon oko 60 K, očitavanje da se vrši sa preciznošću od 0.2 K, a maksimalna greška da bude manja od 1 K. Tipična vrednost koeficijenta inercije termografa je oko 25 s, pri brzini vazduha od 5 ms^{-1}.

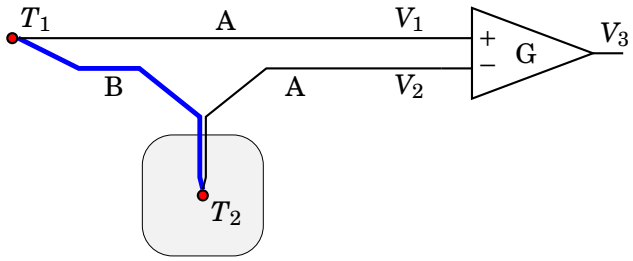
Termograf se postavlja i drži u velikom termometarskom zaklonu.

3.2.2 Termoelektrični senzori

Spoj dva različita metala formira termopar. Kada se dva spoja nalaze na različitim temperaturama u njima se generiše elektromotorna sila. Merenjem napona između dva spoja, može se izračunati razlika u njihovoj temperaturi. Ako je poznata temperatura jednog spoja i ako je izmerena razlika napona, tada se može izračunati temperatura drugog spoja. Termoparovi imaju širok merni opseg, po prirodi (suštinski) su diferencijalni, čvrsti, pouzdani, jeftini i mogu imati

[||] Burdonova cev je zakrivljena elastična metalna cev, eliptičnog poprečnog preseka. Koristi se kao senzor za pritisak, a kada je napunjena alkoholom koristi se kao senzor za temperaturu.

¶ Invar je legura nikla i čelika. Odlikuje se veoma niskim koeficijentom termalnog širenja.



Slika 3.7: Merni sistem koji je zasnovan na termoparu. Dve vrste metala su obeležene sa A i B.

brz odziv. Njihovi osnovni nedostaci su veoma slab izlazni signal, oko $40\,\frac{\mu\mathrm{V}}{^\circ\mathrm{C}}$, nelinearnost (iako mala) i potreba za kalibracijom. Uobičajena konfiguracija termopara je prikazana na slici 3.7 i čine je dva spoja i pojačivač. Spoj 1 je na temperaturi koja se meri T_1, a spoj 2 je referentni spoj i njegova temperatura T_2 se održava konstantnom. Od metala „A“ je napravljen deo od spoja 1 do pojačivača i od spoja 2 do pojačivača, a od metala „B“ deo između spojeva 1 i 2. Ako je jedan metal bakar a drugi konstantan (legura bakra i nikla), tada se taj par spojeva naziva bakar-konstantan termopar. Na slici 3.7 pojačivač se koristi za pojačavanje male vrednosti razlike napona do korisnog nivoa $V_3 = G(V_1 - V_2)$. Električni napon koji se generiše pomoću dva spoja (ova pojava se naziva Zebekov** efekat) je jednak $\Delta V = V_1 - V_2$. On će se javiti u slučaju da nema strujnog toka u električnom kolu. Termopar je po svojoj prirodi diferencijalni senzor; on meri razliku temperature između dva spoja. Apsolutna temperatura se može meriti samo ako se jedan od spojeva drži na poznatoj temperaturi, ili ako se koristi elektronski referentni spoj. Blok od metala (aluminijum, bakar ili bilo koji visoko provodljivi metal) može da se koristi za referentni spoj. U takav blok se ubaci referentni spoj termopara i istovremeno se meri temperatura metalnog bloka termistorom ili nekim drugim pogodnim senzorom. Metalni blok mora da bude u toplotnoj ravnoteži, koja se u većini situacija lako postiže. Alternativno, referentni spoj se može držati na temperaturi topljenja leda, koristeći visoko kvalitetno ledeno kupatilo. Elektronski referentni spoj je uređaj kojim se pomoću električne struje spoj održava na poznatoj temperaturi.

Pretpostavićemo, za sada, da se temperatura referentnog spoja održava na konstantnoj vrednosti od $0\,^\circ\mathrm{C}$ pomoću ledenog kupatila ili elektronskog referentnog uređaja. Izlazni napon termopara (u μV) je dat jednačinom

$$\Delta V = (a + b\Delta T)\Delta T, \tag{3.51}$$

$a = 38.58\,\frac{\mu\mathrm{V}}{^\circ\mathrm{C}}$ i $b = 0.0428\,\frac{\mu\mathrm{V}}{^\circ\mathrm{C}^2}$ za bakar-konstantan. Neka je merni opseg od -50 do 50°C, tada je izlazni signal senzora u μV prikazan u drugoj koloni tabele 3.3. Radi jednostavnijeg poređenja senzori za temperaturu bi trebalo da imaju ulazni signal u opsegu od -50 do 50°C. Dodatno, izlazni signal senzora treba uskladiti sa ulaznim zahtevima konvertora analognog u digitalni signal (ADC), tako da on bude u opsegu od -5 do 5 V. Odabraćemo vrednost pojačanja G, tako

**Thomas Johann Seebeck, 1770-1831, nemačko-estonski fizičar

Tabela 3.3: Izlazni signal termopara bakar-konstantan u slučaju kada je temperatura referentnog spoja održavana na 0°C.

T(°C)	$\Delta V = V_1 - V_2\,(\mu\text{V})$	$V_3\,(\text{V})$
-50	-1822	-4.475
-40	-1475	-3.622
-30	-1119	-2.748
-20	-755	-1.853
-10	-382	-0.937
0	0	0.000
10	390	0.958
20	789	1.937
30	1196	2.937
40	1612	3.959
50	2036	5.000

da pojačani izlazni signal bude 5 V pri temperaturi 50° C i 0 V pri temperaturi od 0° C. Iz tabele 3.3 vidimo da je za $T = 50°\text{C}$, $\Delta V = 2036 \times 10^{-6}\text{V}$, tako da ga treba pojačati za $G = \frac{5}{2036\times 10^{-6}} = 2456$. Izlazni signal iz pojačivača je prikazan u koloni 3 u tabeli 3.3. Na slici 3.8 prikazani su izlazni signal i nelinearnost termopara. Pojačivači sa većim pojačanjem su obično skuplji, mada to postaje sve manje važno sa pojeftinjenjem elektronike. Drugi nedostatak velikog pojačavanja je što se sa povećanjem pojačanja povećava osetljivost na šum[††].

PRIMER 3.6 *Za bakar-konstantan termopar,* $a = 35.58\,\frac{\mu\text{V}}{°\text{C}}$ *i* $b = 0.0428\,\frac{\mu\text{V}}{°\text{C}^2}$. *Ako se referentni spoj održava na* 0°C*, a merni spoj na* 20°C*, napon koji se generiše između spojeva je* $\Delta V = (35.58 + 0.0428 \times 20) \times 20) = 789\,\mu\text{V}$. *Sa pojačivačem pojačanja 2456, izlazni signal je* $V_3 = 789 \times 10^{-6} \times 2456 = 1.937\,\text{V}$.

Više serijski povezanih termoparova čine termoelement. Izlazni napon termoelementa, koga čini n istih, serijski vezanih termoparova je

$$\Delta V = n(a + b\Delta T)\Delta T. \tag{3.52}$$

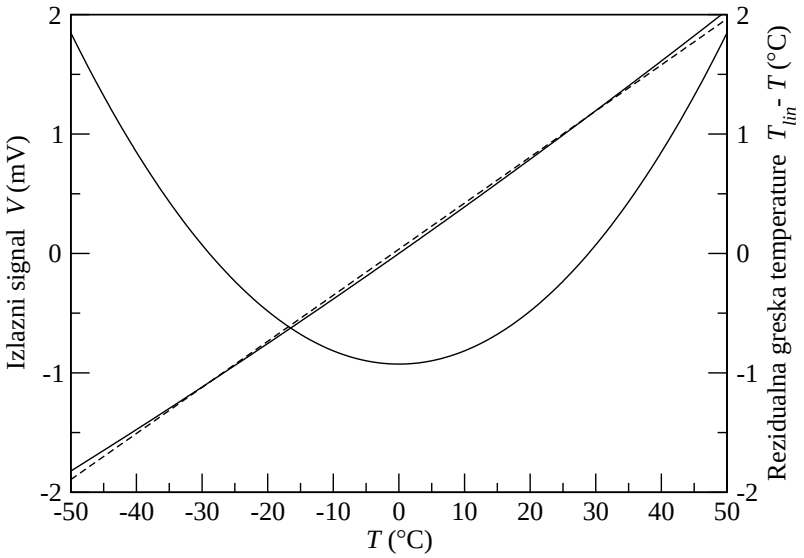
3.2.3 Senzori električnog otpora

Senzori električnog otpora se karakterišu promenom električnog otpora pri promeni temperature. Takvi senzori koji su provodnici električne struje se obično nazivaju ***otporni temperaturni detektori (RTD)***. Drugu značajnu grupu senzora otpora čine poluprovodnici poznati pod imenom ***termistori***.

3.2.3.1 Otporni temperaturni detektori

Precizni otporni termometri se najčešće izrađuju od platine, jer je stabilna, otporna na koroziju, podesna za obradu, ima visoku tačku topljenja i može se dobiti u veoma čistom obliku. Osim toga, relacija između temperature i električnog

[††] Šum je ovde definisan kao slučajna komponenta izlaznog signala koja nije prisutna u merenoj veličini, tj. uzrokovana je samim instrumentom ili interakcijom između senzora i merene veličine. Sve fluktuacije merene veličine smatraju se ulaznim signalom.



Slika 3.8: Izlazni signal termopara bakar-konstantan i rezidualna nelinearnost. Rezidualna nelinearnost temperature ($T_{lin} - T$) je računata kao razlika temperature T_{lin}, koja odgovara pravoj isprekidanoj liniji koja najbolje fituje izlazni signal i temperature T koja je sa izlaznim signalom povezana jednačinom (3.51). Ove vrednosti su dobijene za slučaj kada je temperatura referentnog spoja održavana na 0°C.

otpora za platinu je jednostavna i postojana. Sa druge strane, platina je osetljiva na naprezanje; krivljenje senzora može da promeni električnu otpornost. Otpor platinskog senzora se sa dovoljnom preciznošću za meteorološki temperaturni opseg (ovde uzet od −50 do 50°C) može napisati kao

$$R_T = R_o(1 + aT + bT^2), \tag{3.53}$$

R_o je otpor na 0°C, R_T je otpor senzora na temperaturi T u °C. Vrednosti koeficijenata zavise od čistoće platine; koeficijent a je obično 0.00385 ili 0.00392 °C^{-1}, a $b = -5.85 \times 10^{-7}$°C^{-2}.

Zbog vrlo malog otpora otpornog temperaturnog detektora i njegove male promene sa promenom temperature, često se koristi strujno kolo u obliku Vitstonovog mosta, prikazano na slici 3.9. Ovakvo strujno kolo efikasno konvertuje otpor u električni napon. Napon se može pojačati do razumnog nivoa upotrebom instrumentalnog pojačivača. Izlazni signal iz pojačivača je

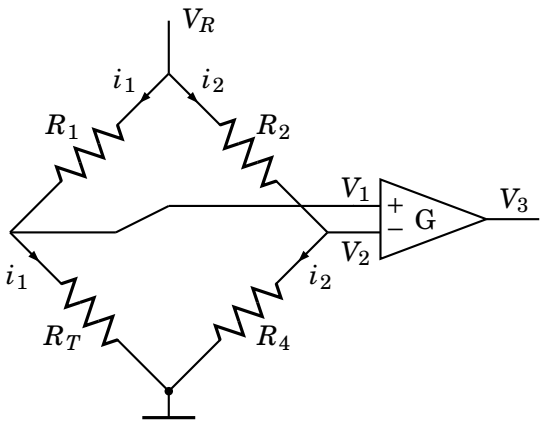
$$V_3 = GV_R\left(\frac{R_T}{R_T + R_1} - \frac{R_4}{R_4 + R_2}\right). \tag{3.54}$$

Ako izaberemo da je $R_4 = R_o$, tj. R_T na 0°C, da su otpori R_1 i R_2 jednaki ($R_2 = R_1$) i da je $R_1 = mR_o$, tada je izlazni signal iz pojačivača

$$V_3 = GV_R\left(\frac{R_T}{R_T + mR_o} - \frac{R_o}{R_o + mR_o}\right) = GV_R\left(\frac{R_T}{R_T + mR_o} - \frac{1}{1+m}\right). \tag{3.55}$$

Osetljivost u odnosu na R_T je

$$S \equiv \frac{dV_3}{dR_T} = \frac{GV_R mR_o}{(R_T + mR_o)^2}. \tag{3.56}$$



Slika 3.9: Šematski prikaz strujnog kola u obliku Vitstonovog mosta sa otpornim temperaturnim detektorom otpora R_T i pojačivačem G.

Maksimalna osetljivost se dobija za m za koje je vrednost prvog izvoda

$$\frac{dS}{dm} = GV_R \frac{(R_T - mR_o)R_o}{(R_T + mR_o)^3} = 0, \tag{3.57}$$

odnosno za $m = R_T/R_o$. Budući da je $R_T = R_o$ kada je $T = 0°\mathrm{C}$, optimalna vrednost konstante $m = 1$. U ovom slučaju izlazni signal iz pojačivača je

$$V_3 = GV_R \left(\frac{R_T}{R_T + R_o} - \frac{1}{2} \right). \tag{3.58}$$

Osetljivost izlaznog signala od temperature je

$$S \equiv \frac{dV_3}{dT} = \frac{GV_R R_o^2 a}{(R_T + R_o)^2}. \tag{3.59}$$

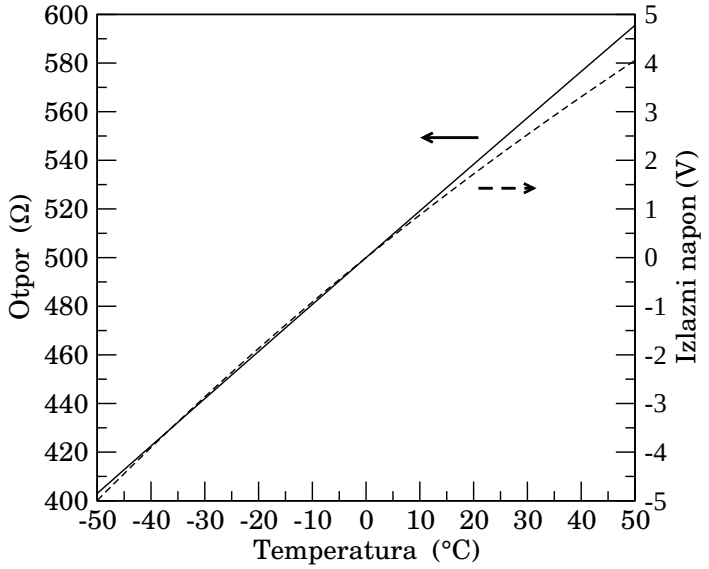
Da bi povećali osetljivost trebalo bi povećati G i V_R jer se nakon odabira RTD-a samo one mogu menjati.

Drugi važan faktor u dizajnu strujnog kola je potreba da se kontroliše samozagrevanje senzora zbog protoka struje kroz RTD. Snaga, P_D, koja se disipira u senzoru otpora R_T, je

$$P_D = I^2 R_T = \frac{V_R^2}{(R_T + R_o)^2} R_T. \tag{3.60}$$

Svaki RTD ima deklarisano samozagrevanje ($\frac{P_D}{T_\epsilon}$): to je količnik disipirane snage P_D i dozvoljene greške merenja T_ϵ . Na taj način se ograničava gornja granica referentnog napona V_R. Stepen pojačanja G se bira tako da se obezbedi adekvatan nivo signala za sledeći blok u mernom sistemu (na primer konvertor analognog signala u digitalni, koji ima dozvoljene granice opsega ulaznog napona).

Ako izabrani RTD ima deklarisano samozagrevanje od $5.9\,\frac{\mathrm{mW}}{°\mathrm{C}}$, pri struji vazduha od $1\,\mathrm{ms}^{-1}$, i ako je maksimalno dozvoljena greška zbog samozagrevanja $0.1\,°\mathrm{C}$, tada iz jednačine (3.60) možemo izračunati V_R. Radi jednostavnosti, izabraćemo da je temperatura $T = 0°\mathrm{C}$, s obzirom na to da se disipirana snaga ne

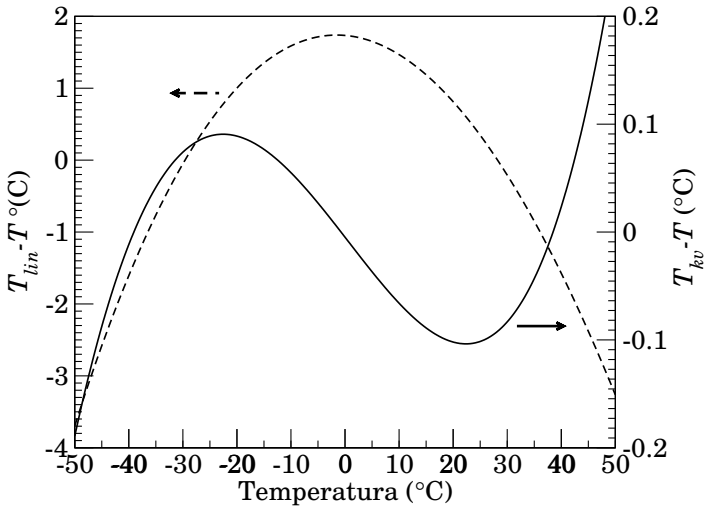


Slika 3.10: Otpor 500 Ω-skog platinskog RTD-a i pojačani izlazni napon iz Vitstonovog mosta ($G = 93$, $V_R = 1$ V).

menja mnogo duž izabranog temperaturnog opsega. Tada je $P_D(0) = \frac{V_R^2}{4R_o}$ i ova vrednost mora biti manja od $5.9\,\frac{\text{mW}}{^\circ\text{C}} \times 0.1\,^\circ\text{C} = 5.9 \times 10^{-4} W$. Ako je $R_o = 500\,\Omega$, tada V_R mora da bude manje od 1.09 V. Odabraćemo da je $V_R = 1.00$ V. Ako je merni opseg -50 do $50\,^\circ$C, tada će maksimalno pojačanje izlaznog signala biti za $-50\,^\circ$C (potrebno da bi izlazni signal posle pojačanja bio -5 V). Ako je, nakon pojačivača, sledeći uređaj u mernom sistemu konvertor analognog signala u digitalni sa opsegom ulaznog signala od -5.00 do 5.00 V, tada treba izabrati pojačanje G tako da je V_3(na $-50\,^\circ$C) $= -5.00$ V. Prema tome, dobijamo da je pojačanje jednako $G = \frac{-5.00}{R_T(-50)/[R_T(-50)+R_o]-1/2} = 93$. Vrednosti veličina R_T i V_3, za različite temperature T, su date u tabeli 3.4. Otpor 500 Ω-skog platinskog RTD-a i pojačani izlazni napon iz Vitstonovog mosta su prikazani na slici 3.10. Rezidualna nelinearnost, izazvana skoro isključivo Vitstonovim mostom, prikazana je na slici 3.11.

Tabela 3.4: Otpor 500 Ω-skog platinskog RTD-a i pojačani izlazni napon iz Vitstonovog mosta (pri $V_R = 1.00$ V i $G = 93$).

T (°C)	R_T (Ω)	V_3 (V)
-50	403.0	-4.994
-30	442.0	-2.864
0	500.0	0.
30	557.5	2.528
50	595.5	4.054



Slika 3.11: Rezidualna nelinearnost otpornog platinskog detektora. Linearna rezidualna greška ($T_{lin} - T$) je prikazana isprekidanom linijom, kvadratna rezidualna greška ($T_{kv} - T$) prikazana je punom linijom. Temperatura T_{lin} se dobija linearnim fitovanjem kalibracione krive, a T_{kv} fitovanjem polinomom drugog stepena.

3.2.3.2 Termistori

Termistori su poluprovodnici kod kojih se električni otpor menja sa promenom temperature. Po hemijskom sastavu su obično oksidi metala. Karakterišu se velikom i potpuno nelinearnom osetljivošću na temperaturu. Kod većine termistora otpor opada sa povećanjem temperature, mada postoji nekoliko njih kod kojih se otpor povećava. Otpor termistora u funkciji temperature može da se napiše u obliku

$$R_T = \exp\left(a_0 + \frac{a_1}{T} + \frac{a_3}{T^3}\right) \tag{3.61}$$

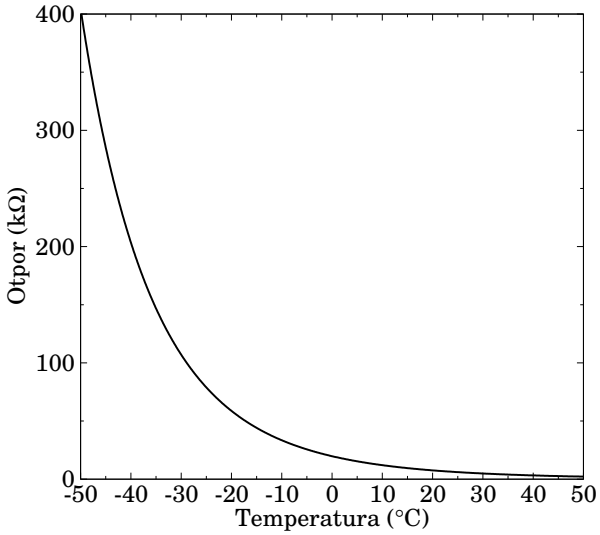
sa T u kelvinima. Koeficijenti za dva termistora su prikazani u tabeli 3.5. Otpor termistora 1 u funkciji temperature prikazan je na slici 3.12. Osetljivost ($S = \frac{dR_T}{dT}$) opada sa porastom temperature. Bez obzira na nelinearnost, termi-

Tabela 3.5: Koeficijenti za dva termistora.

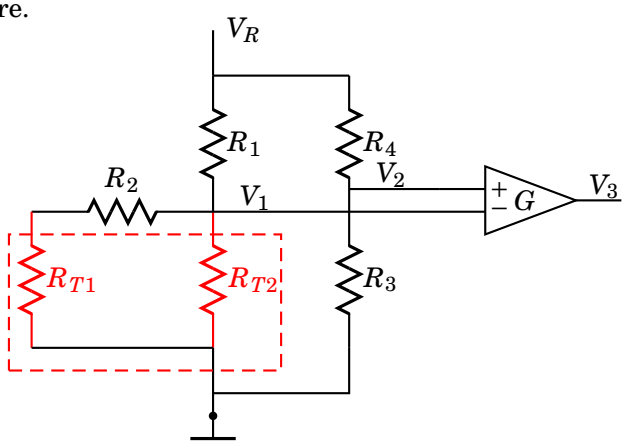
Termistor	a_0	a_1	a_3
1	-5.4019	4356.9	-1.3567×10^7
2	-4.0103	4493.4	-1.9934×10^7

stori imaju vrlo raširenu primenu. Popularni su jer njihov veliki otpor smanjuje osetljivost od otpora provodnih žica i mogu se naći u različitim instrumentalnim konfiguracijama. Izmišljen je veliki broj strujnih kola za linearizaciju termistora. Jedno od najpopularnijih strujnih kola, koje čine dva termistora i dva otpornika, prikazano je na slici 3.13. Napon V_1 je

$$V_1 = \frac{R_{T2}(R_2 + R_{T1})V_R}{R_{T2}(R_1 + R_2 + R_{T1}) + R_1(R_2 + R_{T1})}. \tag{3.62}$$



Slika 3.12: Otpor termistora 1 u funkciji temperature. Osetljivost opada sa porastom temperature.



Slika 3.13: Strujno kolo sa dva termistora, sa skoro linearnim izlaznim signalom. Isprekidana linija uokviruje troterminalni termistorski sklop.

Kada su R_{T1} i R_{T2} otpori termistora 1 i 2 iz tabele 3.5 i ako su $R_1 = 18700\ \Omega$ i $R_2 = 35250\ \Omega$, tada se jednačina (3.62) može aproksimirati linearnom vezom koja je dobijena metodom najmanjih kvadrata

$$V_1 \approx V_R(0.65107 - 0.0067966T), \tag{3.63}$$

T je temperatura u °C i V_R je referentni napon.

PRIMER 3.7 *Koristeći koeficijente za termistore 1 i 2 iz tabele 3.5, naći otpore za oba termistora na temperaturi od* 25 °C.

rešenje: *Iz jednačine (3.61)*

$$R_T = \exp\left(-5.4019 + \frac{4356.9}{298.15} - \frac{1.3567 \times 10^7}{298.15^3}\right) = 5998.8\ \Omega \text{ za termistor 1.}$$

Za termistor 2, $R_T = 29906\ \Omega$.

3.3 Izlaganje senzora za temperaturu

Kada se temperaturni senzor nalazi u vazduhu, instrument će pokazivati određenu temperaturu. Temperatura senzora, međutim, može prilično da se razlikuje od temperature vazduha. Toplota se prenosi ka i od senzora provođenjem, konvekcijom i zračenjem. Vazduh je veoma loš provodnik toplote; uobičajeni izolacioni materijali sadrže mehuriće vazduha unutar komorica potpornog materijala sa tankim zidovima. Za fiksiranje senzora se koriste nosači i oni su, skoro sigurno, bolji provodnici toplote od nepokretnog vazduha. Senzor se nalazi u radijativnoj okolini; hladi se zračenjem toplote u okolni prostor i zagreva dobijanjem toplote izračene sa Sunca i okoline. Za precizno merenje temperature termometar mora da ima dobar toplotni kontakt sa vazduhom. To zahteva postojanje cirkulacije vazduha u cilju povećanja razmene toplote konvekcijom. Takođe, senzor mora da bude zaštićen od prenosa toplote provođenjem kroz nosač, i od transporta toplote zračenjem. Centralni problem kod imerzionih instrumenata u meteorologiji je njihovo povezivanje sa atmosferom. Radi ilistrovanja problema izlaganja, posmatraćemo cilindrični senzor koji je montiran na zidu i izložen strujanju vazduha i sunčevom zračenju, kao što je prikazano na slici 3.14. Pretpostavićemo da senzor nije zaklonjen bilo kakvim zaklonom. Toplota koja se preda senzoru provođenjem, zračenjem i konvekcijom je data izrazima

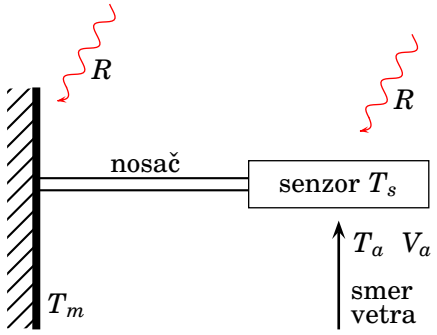
$$\begin{aligned} H_c &= -k_m A_m \frac{\Delta T}{\Delta X} = -k_m A_m \frac{T_s - T_m}{\Delta X}, \\ H_r &= A_s \alpha_s R = \pi D L \alpha_s R, \\ H_v &= cL(T_s - T_a)\sqrt{DV_a}, \end{aligned} \tag{3.64}$$

H_c, H_r, H_v su fluksevi toplote kondukcijom, zračenjem i konvekcijom, k_m je toplotna provodljivost nosača ($\mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$), A_m je poprečni presek nosača ($\mathrm{m^2}$), T_s i T_m temperature senzora i nosača (K), ΔX dužina nosača (m), D i L prečnik i dužina senzora (m), $A_s = \pi DL$ površina senzora bez površine osnova ($\mathrm{m^2}$), α_s apsorptivnost senzora (bezdimenzionalna veličina), R iradijansa globalnog sunčevog zračenja ($\mathrm{Wm^{-2}}$), $c = 8.011\ \mathrm{Wm^{-2}K^{-1}s^{-1/2}}$ je empirijska konstanta i V_a brzina vazduha ($\mathrm{ms^{-1}}$). Jednačina provođenja toplote je uobičajeni izraz za fluks toplote kroz neku sredinu (FurijeFov1G zakon provođenja), u ovom slučaju kroz nosač.

Radijacioni transfer toplote je izražen preko članova koji opisuju dolazno sunčevo zračenje, koje se obično meri piranometrom. Količina toplote koju senzor primi zračenjem zavisi od površine koja prima zračenje, od apsorptivnosti senzora i od intenziteta zračenja. Apsorptivnost senzora je deo dolaznog zračenja koje senzor apsorbuje, i prema tome je $0 \le \alpha_s \le 1$. Kada je $\alpha_s = 0$ senzor reflektuje svo dolazno zračenje, a ako je $\alpha_s = 1$ apsorbuje svo dolazno zračenje (ponaša se kao crno telo).

Za konvekciju se koristi empirijska jednačina pogodna za cilindre kod kojih je dužina veća od prečnika i za slab vetar (Richardson i Brock, 1995), recimo za $0.1 < V_a < 10\ \mathrm{ms^{-1}}$.

Na slici 3.14 šematski je prikazano da Sunce obasjava senzor, zid i nosač, tako da će oni imati veću temperaturu od vazduha. Ako zanemarimo transfer



Slika 3.14: Model transfera toplote provođenjem, konvekcijom i zračenjem.

toplote provođenjem (pretpostavimo da je nosač dobar izolator), možemo da izračunamo porast temperature senzora uzimajući da je $H_r = H_v$ (ovo je stacionarni primer u kojem gubitak energije konvekcijom mora da se izjednači sa energijom koja se dobije apsorpcijom zračenja); tada želimo da minimiziramo

$$T_s - T_a = \frac{\pi}{c}\alpha_s R\sqrt{\frac{D}{V_a}}. \tag{3.65}$$

Da bi smo to uradili moramo da minimiziramo α_s, R i D i da maksimiziramo V_a. U ovom jednostavnom primeru, samo α_s i D mogu da se biraju pri projektovanju senzora. To znači da bi trebalo praviti visoko reflektivne senzore (najmanje α_s) i senzore najmanje moguće debljine. Veoma je teško smanjiti refleksivnost ispod $\alpha_s < 0.2$, posebno kod senzora koji su duže izloženi u atmosferi, jer nakupljena prašina veoma povećava apsorptivnost.

Kod senzora za temperaturu u radiosondama energetska i težinska ograničenja onemogućavaju upotrebu ventilatora radi povećavanja opstrujavanja. Takođe, kod njih je teško ugraditi bilo kakav zaklon od sunčevog zračenja, pa se zbog toga koriste beli ili srebrnasti senzori vrlo malog prečnika. Na primer, Turtiainen i dr. (1995) su razvili visoko reflektivni senzor temperature za radiosondu prečnika od 100 μm. Greška izazvana zračenjem je kod njega manja od 0.5°C, čak i kada je izložen direktnom zračenju Sunca na velikim visinama. Senzor je pričvršćen nosačem prečnika 100 μm, tako da je minimizirano i provođenje toplote, budući da je provođenje proporcionalno površini poprečnog preseka nosača.

Radiosonde (npr. Vaisala RS-90) koriste nezaklonjeni, visoko reflektivni senzor prečnika 0.1 μm. Greška izazvana zagrevanjem zračenjem je približno 0.5 K na 10 mb, i posle korekcije, preostala greška je reda 0.1 K. Koeficijent inercije (vremenska konstanta) tog senzora je približno 0.5 s.

PRIMER 3.8 *Senzor za temperaturu cilindričnog oblika, prečnika* 1 cm*, ima apsorptivnost* $\alpha_s = 0.2$*. Brzina vetra je* 2 ms^{-1} *i iradijansa sunčevog zračenja je* 500 Wm^{-2}*. Greška senzora u ovakvim uslovima, prema jednačini (3.65), je*

$$\Delta T = T_s - T_a = \frac{\pi}{8.011}0.2 \times 500\sqrt{\frac{0.01}{2}} = 2.8°\mathrm{C}.$$

Kada bi debljina senzora bila smanjena na 1 mm, greška bi bila $\Delta T = 0.9°\mathrm{C}$.

U nekim mikrometeorološkim i agrometeorološkim primenama potrebna su merenja temperature blizu ili ispod listova, tako da je teško koristiti bilo kakvu vrstu zaklona. Zato se koriste mali, visokoreflektivni senzori, baš kao u radiosondama.

Glava 4

Merenje vlažnosti vazduha

Svrha merenja atmosferske vlažnosti je da se odredi količina vodene pare u atmosferi izražena preko mase, zapremine, parcijalnog pritiska ili dela ravnotežnog pritiska vodene pare u odnosu na ravnu površinu čiste vode.

4.1 Pritisak vodene pare

Pritisak čiste vodene pare koja je u ravnoteži sa ravnom površinom čiste vode označićemo sa e'_s. On je funkcija temperature vodene pare i tečne vode. Ako pretpostavimo da se latentna toplota isparavanja vode menja linearno sa promenom temperature po zakonu $L_v = L_{vo}[1 + \alpha(T - T_o)]$, integraljenjem Klauzijus-Klapejronove jednačine

$$\frac{de'_s}{e'_s} = \frac{L_v}{R_v}\frac{dT}{T^2}, \tag{4.1}$$

dobijamo

$$e'_s = e'_{so}\exp\left[\frac{L_{vo}}{R_v}\left(\frac{T - T_o}{TT_o} + \alpha\ln\frac{T}{T_o} - \frac{\alpha(T - T_o)}{T}\right)\right], \tag{4.2}$$

$T_o = 273.15\,\mathrm{K}$, $L_{vo} = 2.5008 \times 10^6\,\mathrm{Jkg^{-1}}$ je latentna toplota isparavanja vodene pare na temperaturi T_o, $R_v = 461.51\,\mathrm{Jkg^{-1}K^{-1}}$ je gasna konstanta vodene pare, $e'_{so} = 611.21\,\mathrm{Pa}$ je ravnotežni pritisak vodene pare na temperaturi T_o i $\alpha = -9.477 \times 10^{-4}\mathrm{K^{-1}}$ je srednja vrednost promene latentne toplote isparavanja čiste vode sa promenom temperature. Kako vodena para nije idealan gas, gornja jednačina nije potpuno tačna. Ravnotežni pritisak vodene pare u funkciji temperature se može eksperimentalno odrediti. Fitovanjem eksperimentalno dobijenih vrednosti, Wexler (1976, 1977) je predložio empirijsku formulu za pritisak zasićene vodene pare

$$e'_s = \exp\left(\frac{c_1}{T^2} + \frac{c_2}{T} + c_3 + c_4T + c_5T^2 + c_6T^3 + c_7T^4 + c_8\ln T\right), \tag{4.3}$$

T je u K, e'_s u Pa, a koeficijenti za pritisak zasićene vodene pare iznad vode i iznad leda su prikazani u tabeli 4.1.

Tabela 4.1: Koeficijenti za empirijsku jednačinu (4.3) za ravnotežni pritisak vodene pare iznad ravne površine čiste vode i iznad leda.

koeficijent	voda	led
c_1	-2991.272	0.0
c_2	-6017.0128	-5865.3696
c_3	18.87643854	22.241033
c_4	-0.028354721	-0.013749042
c_5	0.17838301×10^{-4}	-0.34031775×10^{-4}
c_6	-0.84150417×10^{-9}	0.26967687×10^{-7}
c_7	0.44412543×10^{-12}	0.0
c_8	2.858487	0.6918651

Obe jednačine (4.1) i (4.2) su nepodesne za računanje temperature. Buck (1981) je predložio jednačinu

$$e'_s = 6.1121 \exp\left(\frac{17.502T}{240.97+T}\right) \tag{4.4}$$

koja je jednostavna za upotrebu i dovoljno precizna u temperaturnom opsegu od -30 do 50°C, T je temperatura u stepenima celzijusa i e'_s ravnotežni pritisak vodene pare u hPa (mb). Jednačina (4.4) je pogodna za računanje temperature tačke rose, ako je poznat stvarni pritisak vodene pare. Na slici 4.1 je prikazan ravnotežni pritisak vodene pare u funkciji temperature.

Kod realnih gasova postoji malo odstupanje od Daltonovog zakona, tako da u atmosferi postoji slab uticaj ukupnog vazdušnog pritiska na ravnotežni pritisak pare. Pritisak zasićene vodene pare u smeši suvog vazduha i vodene pare je pritisak čiste vodene pare pomnožen faktorom povećanja: $e_s = e'_s(T) \times f(T,p)$. Faktor povećanja se menja sa pritiskom i vrlo malo sa temperaturom. Za $p >$ 800 hPa, možemo koristiti vrednost $f = 1.004$, pa je ravnotežni pritisak vodene pare u vazduhu iznad ravne površine čiste vode

$$e_{sw} = 6.1365 \exp\left(\frac{17.502T}{240.97+T}\right) \tag{4.5}$$

i iznad ravne površine leda

$$e_{si} = 6.1359 \exp\left(\frac{22.452T}{272.55+T}\right). \tag{4.6}$$

4.2 Veličine koje karakterišu vlažnost vazduha

Vlažnost vazduha se može izraziti različitim veličinama. Njihove definicije će biti date u tekstu koji sledi.

Apsolutna vlažnost, $d_v = \frac{m_v}{V}$, je masa vodene pare u jediničnoj zapremini vlažnog vazduha u jedinicama kgm^{-3}.

Temperatura tačke rose, T_d, je temperatura do koje vazduh treba da se ohladi, pri konstantnom pritisku i konstantnom sadržaju vodene pare, da bi došlo do njegovog zasićenja u odnosu na vodu. Ako je temperatura ispod 0°C, može

se definisati i ***tačka slane***, T_f, na kojoj pri istim uslovima hlađenjem vazduh postaje zasićen u odnosu na led. Temperature tačke rose i tačke slane se mogu izračunati iz stvarnog pritiska vodene pare, e, rešavanjem jednačina (4.5) i (4.6) po T

$$\begin{aligned} T_d &= 240.97 \frac{\ln \frac{e}{6.1365}}{17.502 - \ln \frac{e}{6.1365}} \\ T_f &= 272.55 \frac{\ln \frac{e}{6.1359}}{22.452 - \ln \frac{e}{6.1365}}. \end{aligned} \tag{4.7}$$

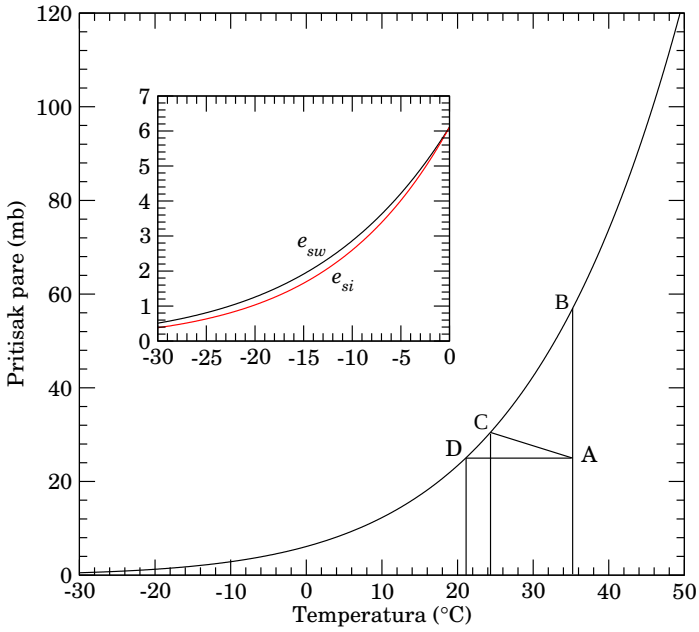
Odnos smeše, $r = \frac{m_v}{m_d}$, je količnik mase vodene pare m_v i mase suvog vazduha m_d.

Specifična vlažnost, $q = \frac{m_v}{m_v + m_d}$, je količnik mase vodene pare i mase vlažnog vazduha, $m_v + m_d$.

Pritisak vodene pare, e, je parcijalni pritisak vodene pare u vazduhu.

Relativna vlažnost, $U = 100 \frac{e}{e_s}$, je količnik stvarnog pritiska vodene pare e u vazduhu i maksimalnog pritiska vodene pare e_s u odnosu na ravnu površinu čiste vode, na temperaturi vazduha. Izražena je u procentima.

Virtuelna temperatura, T_v, je temperatura koju bi trebao da ima suvi vazduh, da bi na istom pritisku imao istu gustinu kao vlažan vazduh. Može se



Slika 4.1: Pritisak zasićene vodene pare u odnosu na ravnu površinu čiste vode u funkciji temperature (na osnovu jednačine (4.3)). Na manjoj slici prikazan je ravnotežni pritisak vodene pare u odnosu na ravnu površinu čistog leda, e_{si} i u odnosu na ravnu površinu čiste vode, e_{sw}. Tačkama B, C i D redom su obeležena mesta koje bi delić vazduha sa temperaturom i pritiskom vodene pare koji odgovaraju tački A imao ako bi se zasitio dodavanjem vodene pare, vlažnoadijabatski i hlađenjem bez dodavanja vodene pare.

napisati u obliku

$$\begin{aligned} T_v &= T(1+0.608q) \\ &\text{ili} \\ T_v &= \frac{T}{1-\frac{e}{p}(1-0.622)}. \end{aligned} \tag{4.8}$$

Temperatura mokrog termometra, T_w, je temperatura koju pokazuje mokri termometar psihrometra, odnosno, temperatura senzora pokrivenog čistom vodom koja slobodno isparava u struji vazduha.

Često korišćene aproksimacije, dovoljno tačne za primene u meteorologiji su:

$$\begin{aligned} r &= 0.622\frac{e}{p-e}, \\ e &= \frac{rp}{0.622+r}, \\ q &= \frac{r}{1+r}, \\ d_v &= 0.002167\frac{e}{t+273.15}, \quad d_v(\mathrm{kgm}^{-3}),\, e(\mathrm{Pa}),\, t(^\circ\mathrm{C}). \end{aligned} \tag{4.9}$$

4.3 Metodi merenja vlažnosti

Vlažnost vazduha se može meriti različitim higrometrijskim metodima, koji su zasnovani na različitim fizičkim principima (Wexler, 1970): uklanjanje vodene pare iz vlažnog vazduha, dodavanje vodene pare vlažnom vazduhu, ravnotežna sorpcija vodene pare, postizanje ravnoteže para-tečnost i para-čvrsto stanje, merenje fizičkih osobina vlažnog vazduha i hemijske reakcije.

4.3.1 Uklanjanje vodene pare iz vlažnog vazduha

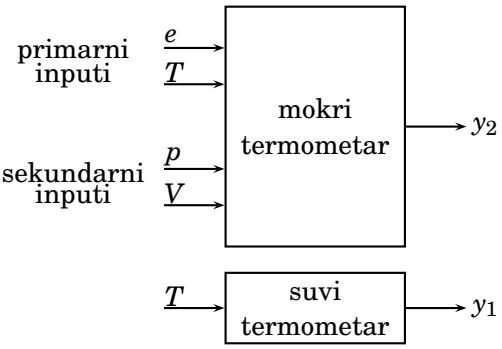
Vodena pare se može ukloniti iz vlažnog vazduha apsorpcijom jakim apsorberima, zatim prehlađivanjem vazduha i uklanjanjem kristala leda i razdvajanjem molekula vodene pare od suvog vazduha polupropustljivim membranama. Nakon odvajanja vodene pare mere se mase vode i suvog vazduha i iz izmerenih vrednosti računa relativna vlažnost.

4.3.2 Dodavanje vodene pare vlažnom vazduhu

Psihrometar je instrument za merenje vlažnosti vazduha čiji se rad zasniva na principu dodavanja vodene pare vlažnom vazduhu. Čine ga dva obična stanična termometra. Rezervoar jednog od termometara je uvijen mokrom krpicom. Krpica se može kvasiti neposredno pre merenja potapanjem u sud sa čistom destilovanom vodom ili kontinuarno preko fitilja umočenog u vodu. U nezasićenom vazduhu voda isparava sa krpice i vlaži vazduh. Zbog isparavanja vode ovaj termometar pokazuje temperaturu nižu od temperature vazduha. Termometar koji ima ovlažen rezervoar naziva se ***mokri termometar***, a temperatura koju on pokazuje je temperatura mokrog termometra T_w. Što je manja vlažnost vazduha isparavanje je intenzivnije, a razlika temperatura suvog i mokrog termometra,

koja se zove ***depresija mokrog termometra***, veća. Dodatnom ventilacijom pomoću aspiratora se povećavaju brzina izparavanja vode sa mokrog termometra i razmena toplote između termometara i okolnog vazduha konvekcijom i tako popravljaju karakteristike psihrometra. Prirodna ventilacija je dovoljna samo u slučaju kada se koriste mali senzor za temperaturu i odgovarajuća krpica, ili kada je brzina vetra dovoljno velika. Relacija koja povezuje relativnu vlažnost vazduha sa depresijom mokrog termometra naziva se psihrometarska formula.

Funkcionalni model psihrometra je prikazan na slici 4.2. U ovom modelu postoje dva zasebna senzora: suvi i mokri termometar. Mokri termometar ima dva primarna inputa, temperaturu vazduha i pritisak vodene pare, i dva sekundarna inputa, pritisak i brzinu vetra. Temperatura mokrog termometra malo zavisi od atmosferskog pritiska i brzine vetra.



Slika 4.2: Funkcionalni model psihrometra. Neobrađeni izlazni signali y_1 i y_2 posle kalibracije postaju T i T_w.

Izvori grešaka kod merenja psihrometrom su:

- *Osetljivost, tačnost i uparenost senzora za temperaturu*. Psihrometar je, kao što ćemo pokazati kasnije, manje osetljiv na apsolutnu grešku senzora nego na relativnu grešku između mokrog i suvog senzora.

- *Brzina ventilacije*. Brzina ventilacije obično treba da bude najmanje 3 ms^{-1}, da bi se povećala razmena toplote konvekcijom i isparavanjem i smanjila razmena toplote provođenjem i zračenjem. Minimalna brzina ventilacije zavisi od termalne mase senzora. Senzori u obliku termopara napravljeni od tanke žice sa finom pamučnom krpicom su uspešno korišćeni bez prisilne ventilacije (Stigter i Welgraven, 1976).

- *Zračenje koje dolazi do senzora za temperaturu*. Senzori moraju biti zaštićeni od direktnog i reflektovanog sunčevog i infracrvenog zemljinog zračenja. Zračenje je glavni izvor grešaka kod merenja u prirodi, a beznačajno je u laboratorijskim uslovima.

- *Veličina, oblik, materijal i kvašljivost krpice.* Uvek treba koristiti originalnu, specijalno pripremljenu psihrometarsku krpicu, nikako krpicu od običnog pamuka. Komercijalne pamučne tkanine obično sadrže hidrofobne ili hemikalije koje sprečavaju kvašenje. Krpicu psihrometra kojim se

vrše kontinuarna merenja treba povremeno iskuvati u rastvoru natrijum-hidroksida i deterdženta, zatim iskuvati u destilovanoj vodi i isprati destilovanom vodom pre upotrebe.

- *Međusobni položaj mokrog i suvog termometra*. Vazduh ne sme da struji od vlažnog ka suvom termometru.
- *Voda kojom se kvasi krpica*. Za kvašenje krpice treba koristiti isključivo destilovanu ili dejonizovanu vodu.

4.3.2.1 Psihrometarska formula

Promena mase vodene pare zbog isparavanja vode sa površine mokrog termometra u jedinici vremena je

$$\frac{dm_v}{dt} = SD_v(e_s(T_w) - e), \tag{4.10}$$

m_v je masa vodene pare, S je površina sa koje se vrši isparavanje, D_v je koeficijent difuzije vodene pare u vazduhu, $e_s(T_w)$ pritisak zasićene vodene pare na temperaturi mokrog termometra i e je pritisak vodene pare u vazduhu. Za isparavanje ove mase vode potrebno je utrošiti količinu toplote

$$Q_1 = L_v SD_v(e_s(T_w) - e). \tag{4.11}$$

Q_1 je utrošena količina toplote u jedinici vremena i L_v je latentna toplota isparavanja vode. Toplotu potrebnu za isparavanje mokri termometar dobija od okolnog vazduha

$$Q_2 = \alpha S(T - T_w) \tag{4.12}$$

i od dela živinog konca koji se nalazi iznad rezervoara

$$Q_3 = \lambda s \frac{T - T_w}{z}. \tag{4.13}$$

Q_2 je količina toplote koju mokri termometar dobije u jedinici vremena od okolnog vazduha, α je koeficijent toplotne razmene između rezervoara i okolnog vazduha, Q_3 je količina toplote koju rezervoar mokrog termometra dobije u jedinici vremena provođenjem kroz živin stub u kapilari, λ ($\mathrm{Wm^{-1}K^{-1}}$) je toplotna provodljivost žive, s je površina poprečnog preseka živinog stuba u kapilari i $\frac{T-T_w}{z}$ je veličina koja karakteriše gradijent temperature u živinom stubu mokrog termometra. Brzina promene temperature mokrog termometra određena je razlikom između flukseva toplote ka i od mokrog termometra

$$C\frac{dT_w}{dt} = Q_2 + Q_3 - Q_1, \tag{4.14}$$

ili

$$C\frac{dT_w}{dt} = \alpha S(T - T_w) + \lambda s \frac{T - T_w}{z} - L_v SD_v(e_s(T_w) - e), \tag{4.15}$$

C je toplotni kapacitet rezervoara mokrog termometra. Kada se uspostavi toplotna ravnoteža (pri $\frac{dT_w}{dt} = 0$) iz jednačine (4.15) dobijamo psihrometarsku formulu

$$e = e_s(T_w) - \frac{\alpha + \frac{\lambda s}{zS}}{L_v D_v}(T - T_w). \tag{4.16}$$

Ako je zavisnost difuzivnosti vodene pare u vazduhu od pritiska data kao

$$D_v = D_{vo}\frac{p_o}{p}, \tag{4.17}$$

gde je p_o standardni pritisak, psihrometarsku formulu možemo napisati u obliku

$$e = e_s(T_w) - \frac{\alpha + \frac{\lambda s}{zS}}{L_v D_{vo} p_o} p(T - T_w) \tag{4.18}$$

ili

$$e = e_s(T_w) - Ap(T - T_w), \tag{4.19}$$

gde je A psihrometarski koeficijent

$$A = \frac{\alpha + \frac{\lambda s}{zS}}{L_v D_{vo} p_o}. \tag{4.20}$$

Zavisnost psihrometarskog koeficijenta od brzine vazdušne struje data je preko zavisnosti α i D_v od Rejnoldsovog broja. Psihrometar čiji koeficijent ne zavisi od brzine vazduha je idealni psihrometar. Empirijski je dobijena zavisnost psihrometarskog koeficijenta od brzine vazduha u obliku

$$A = A_\infty\left(1 + \frac{a}{V^b}\right), \tag{4.21}$$

A_∞ je psihrometarski koeficijent pri velikoj brzini vazduha. Za idealni psihrometar $a = 0$. Eksperimentalno određene vrednosti psihrometarskog koeficijenta su $A = 0.00062\,^\circ\mathrm{C}^{-1}$, kada je rezervoar prekriven tečnom vodom i $A = 0.00054\,^\circ\mathrm{C}^{-1}$, kada je rezervoar prekriven ledom.

Iz definicije relativne vlažnosti $U = \frac{e}{e_s(T)}$, korišćenjem jednačine (4.19) dobijamo

$$U = \frac{e_s(T_w)}{e_s(T)} - \frac{Ap(T - T_w)}{e_s(T)}. \tag{4.22}$$

Integraljenjem Klauzijus-Klapejronove jednačine od T do T_w dobijamo

$$\int_{e_s(T)}^{e_s(T_w)} \frac{de_s}{e_s} = \frac{L_v}{R_v}\int_T^{T_w} \frac{dT}{T^2} \quad \Rightarrow \quad \ln\frac{e_s(T_w)}{e_s(T)} = -\frac{L_v}{R_v}\frac{T - T_w}{TT_w}. \tag{4.23}$$

Razvojem poslednjeg izraza u Tejlorov red, uz zadržavanje samo prva dva člana imamo

$$e_s(T_w) \approx \left(1 - \frac{L_v}{R_v}\frac{T - T_w}{TT_w}\right) e_s(T). \tag{4.24}$$

Iz jednačina (4.22) i (4.24) dobijamo izraz za računanje relativne vlažnosti

$$U = 1 - \frac{L_v}{R_v}\frac{T - T_w}{TT_w} - \frac{Ap(T - T_w)}{e_s(T)} \quad \Rightarrow \quad U \approx 1 - \left(\frac{L_v}{R_v T^2} + \frac{Ap}{e_s(T)}\right)(T - T_w). \tag{4.25}$$

Ovde smo uzeli u obzir da je $\frac{1}{TT_w} \approx \frac{1}{T^2}$.

Iz jednačine (4.25) možemo proceniti osetljivost merenja relativne vlažnosti na grešku merenja psihrometarske razlike :

$$\frac{dU}{d(T - T_w)} = -\frac{L_v}{R_v T^2} - \frac{Ap}{e_s(T)} \tag{4.26}$$

i grešku merenja temperature

$$\begin{aligned}
\frac{dU}{dT} &= (T - T_w)\left(\frac{2L_v}{R_v T^3} + \frac{Ap}{e_s^2(T)}\frac{de_s(T)}{dT}\right) \qquad \xrightarrow{\frac{de_s(T)}{e_s(T)dT} \text{ iz (4.23)}} \\
&= (T - T_w)\frac{L_v}{R_v T^2}\left(\frac{2}{T} + \frac{Ap}{e_s(T)}\right) \qquad \xrightarrow{(T - T_w) \text{ iz (4.25)}} \\
&= (1 - U)\frac{L_v}{R_v T^2}\frac{\frac{2}{T} + \frac{Ap}{e_s(T)}}{\frac{L_v}{R_v T^2} + \frac{Ap}{e_s(T)}} \\
&= (1 - U)\frac{L_v}{R_v T^2}\frac{1 + \frac{2e_s(T)}{ApT}}{1 + \frac{L_v e_s(T)}{ApR_v T^2}}.
\end{aligned} \tag{4.27}$$

PRIMER 4.1 *Procenimo osetljivost merenja relativne vlažnosti u slučajevima kada je temperatura izmerena suvim termometrom bila $T_1 = 20\,^\circ C$ i $T_2 = -40\,^\circ C$, pri relativnoj vlažnosti $U = 60\%$ i pritisku $p = 1000\,mb$. Vrednost psihrometarskog koeficijenta je $A = 0.00067 K^{-1}$.*

rešenje: *Iz jednačina (4.26) i (4.27) dobijamo*

$$za\ T_1 = 20\,^\circ C: \quad \frac{dU}{d(T - T_w)} \approx -0.1K^{-1}, \quad \frac{dU}{dT} \approx 0.01K^{-1} \quad \Rightarrow \quad \left|\frac{\frac{dU}{dT}}{\frac{dU}{d(T - T_w)}}\right| \approx 0.1$$

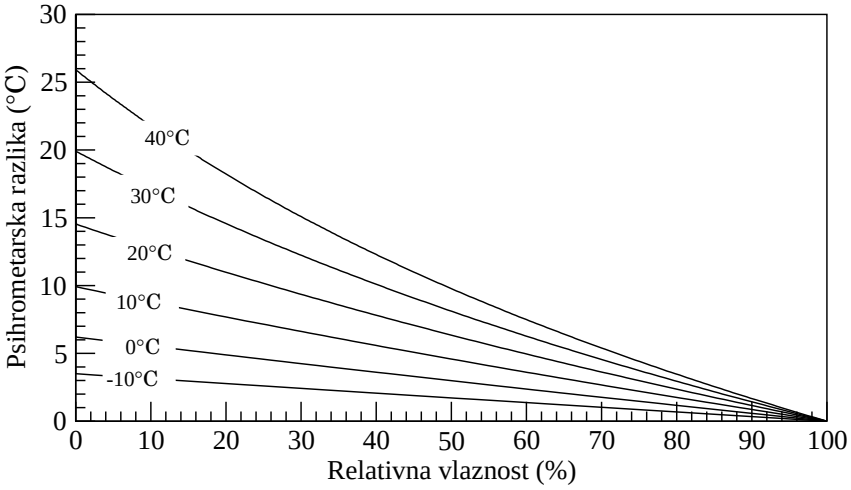
$$za\ T_1 = -40\,^\circ C: \quad \frac{dU}{d(T - T_w)} \approx -3.8K^{-1}, \quad \frac{dU}{dT} \approx 0.04K^{-1} \quad \Rightarrow \quad \left|\frac{\frac{dU}{dT}}{\frac{dU}{d(T - T_w)}}\right| \approx 0.01$$

Znači greška pri merenju psihrometarske razlike od $1\,^\circ C$ će izazvati 10 ili 100 puta veću grešku relativne vlažnosti, od greške prouzrokovane greškom od $1\,^\circ C$ pri merenju temperature.

Na slici 4.3 prikazane su ***krive prenosa*** tj. grafički prikaz vrednosti izlaznog signala u zavisnosti od ulaznog signala, tzv. ***funkcije prenosa*** za psihrometar. Statička osetljivost, $S = \frac{d(T_w - T)}{dU}$, raste sa povećanjem temperature i smanjuje se sa porastom relativne vlažnosti.

4.3.3 Ravnotežna sorpcija vodene pare

Vodena para interaguje sa skoro svim supstancama, preko procesa sorpcije (apsorpcija i/ili adsorpcija) i ponekad preko hemijskih reakcija. Ti procesi izazivaju širenje ili skupljanje materijala, ili se menja njihov otpor ili električni



Slika 4.3: Izlazni signal psihrometra: psihrometarska razlika, $T - T_w$, u funkciji relativne vlažnosti, pri različitim temperaturama vazduha.

kapacitet. Kada su promename materijala dovoljno reverzibilne i ako se mogu reprodukovati i detektovati, takav materijal se može se koristiti kao senzor za vlagu. Osmotreno je da su za izabrani senzor veličina, težina, otpor ili kapacitivnost proporcionalni relativnoj vlažnošti vazduha.

Neke karakteristike sorpcionih senzora su prikazane u tekstu koji sledi.

- Ulazni signal za senzor ne može da bude relativna vlažnost, jer ne postoji fizička karakteristika molekula vodene pare u deliću vazduha koja odgovara relativnoj vlažnosti. Izuzetno je retko naći ravnu površinu vode u prirodi i jednako retko vodenu paru u ravnoteži sa njom. S obzirom na to da je relativna vlažnost vazduha količnik parcijalnog pritiska vodene pare u vazduhu e i pritiska zasićene vodene pare e_s iznad ravne površine tečne vode, ulazni signal senzora može da bude e i T ali ne i e_s. Senzor može na neki način da izračuna e_s iz T, ili mora da sadrži u sebi neku količinu tečne vode sa slobodnom površinom, iako ne neophodno ravnom.

- Nikola Kuzanski (Nicholas de Cusa, 1401-1464) je primetio da se masa vune povećava sa povećanjem vlažnosti vazduha. Smotuljk vune na jednom tasu je uravnotežavan tegovima na drugom tasu vage. Pri promeni vlažnosti vazduha se pojavljivao debalans u težini, koji se merio na kružnoj skali vage. Kinezi su pre nove ere koristili drveni ugalj kao apsorbens vlage iz vazduha. Iz razlike u težini uglja procenjivali su sadržaj vlage u vazduhu. Denton i dr. (1985) su eksperimentalno utvrdili da je masa sorpcionog senzora proporcionalna relativnoj vlažnosti, i pokazali da voda prikupljena u senzoru može da bude u tečnoj ili čvrstoj fazi.

- Pokazano je, iz dielektričnih osobina senzora, da je vodena supstanca u senzoru u tečnom obliku. Evidentno, voda formira tanak film tečne vode, debljine svega nekoliko molekula, na površini senzora ili na površini pora u senzoru. Poznato je da voda u senzoru ne menja agregatno stanje čak i pri temperaturama do $-50°$C. Postoji velika promena dielektrične konstante

vode pri promeni agregatnog stanja, a takva promena nije osmotrena. To bi naročito trebalo da bude očigledno u kapacitivnim senzorima. Anderson (1995) je pokazao da je debljina filma vode, odnosno masa vode, u skoro linearnoj vezi sa relativnom vlažnošću u većem delu opsega i da ta zavisnost postaje sasvim nelinearna kada je relativna vlažnost veća od 90%.

- Sorpcioni senzor mora da bude, u najgorem slučaju, slabo higroskopan kako bi nastavio da funkcioniše u uslovima male relativne vlažnosti na visokim temperaturama (do 100°C).

Iz ovih osmatranja možemo zaključiti da sorpcioni senzori treba da budu higroskopni i porozni, sa porama koje su kontinualno popunjene tankim filmom tečne vode. Masa tečne vode u senzoru je proporcionalna relativnoj vlažnosti i ona izaziva sekundarne efekte (promene kapaciteta, otpora itd.) u posmatranom senzoru. S obzirom na to da film vode može da sadrži nečistoće i da površina skoro sigurno nije ravna (može da bude veoma zakrivljena), izlazni signal može da bude nelinearan i najverovatnije zahteva kalibraciju.

4.3.3.1 Električni higrometri

Senzori električnih higrometara su sorpcioni senzori kod kojih apsorbovana voda uzrokuje promene električnih parametara kao što su električni otpor ili kapacitet. Ulazni signali takvog senzora mogu da budu pritisak vodene pare e i temperatura T.

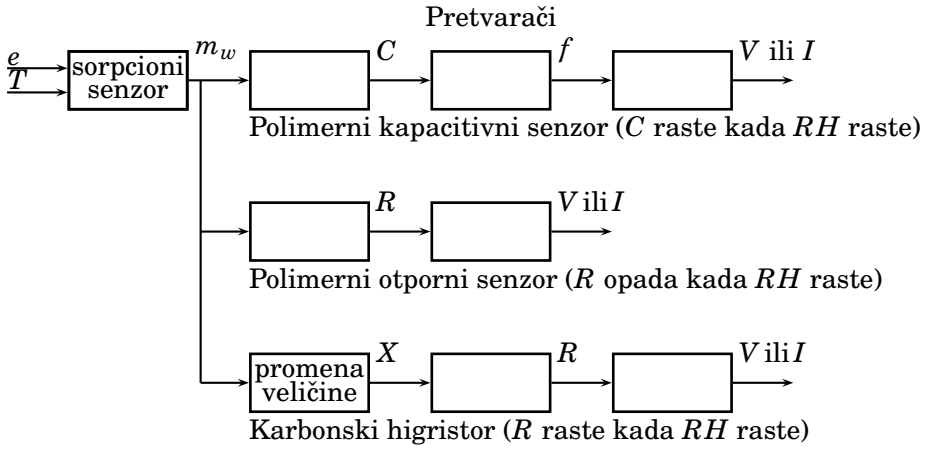
Kapacitivni senzor čine staklena podloga potrebna zbog mehaničke čvrstine, tanak zlatni sloj (jedna kondenzatorska obloga), tanak sloj polimera (sorpcioni sloj) i jedan veoma tanak sloj od zlata (druga kondenzatorska obloga). Sorpcioni sloj mora da bude dovoljno tanak da brzo propušta molekule vodene pare ili mora biti u obliku vertikalno postavljenih traka. Korišćeni polimer ima malu dielektričnu konstantu (oko 4). Voda ima dielektričnu konstantu od oko 80, tako da sorpcija male količine vode između elektroda izaziva promenu kapaciteta kondenzatora.

Anderson (1995) je pokazao da debljina filma vode na senzoru veoma malo zavisi od temperature, tako da osmotrena osetljivost kapacitivnih senzora od temperature najverovatnije potiče od zavisnosti dielektrične konstante vode od temperature.

Funkcionalni model kapacitivnih senzora je predstavljen u gornjem redu blokova na slici 4.4. Sirovi izlaz senzora je masa prikupljene vode, mada se ta masa meri indirektno preko promene kapaciteta senzora. Kapacitet senzora se prvo konvertuje u frekvenciju i zatim u električni napon pomoću elektronike na samom senzoru.

Drift[§] može uticati na senzor na različite načine. Prašina na senzoru može da prikupi neku količinu vode i da tako promeni kapacitet. Ova greška nije trajna jer se pranjem senzora čistom vodom mogu ponovo uspostaviti njegove deklarisane karakteristike. Radi sprečavanja taloženja prašine često se koriste filteri

[§]Drift je vrsta greške instrumenta koja se javlja nakon kalibracije zbog promena u samom senzoru.



Slika 4.4: Model ulazno izlaznih signala za neke električne higrometre.

sa finim porama. Međutim, voda koja se može kondenzovati na filteru će vlažiti vazduh i izazvati grešku pri merenju. Stalni drift može da bude izazvan nekim nečistoćama u vazduhu kao sto je SO_2. I na kraju, elektronske komponente koje se koriste za konverziju kapaciteta u frekvenciju i zatim u napon mogu izazvati neke greške. Kombinujući sve nabrojane izvore grešaka, nije iznenađujuće da ovi uređaji mogu imati grešku i da mogu dati vrednost relativne vlažnosti koja je veća od 100%.

Drugi način za dobijanje izlaznog signala u obliku napona je korišćenje efekta koji ima prikupljena voda na električni otpor senzora. Ovde će biti prikazana dva primera. U srednjem redu na slici 4.4 je prikazan polimerni otporni senzor. Ovaj senzor ima relativno debeo polimerni sloj (u poređenju sa slojem kod kapacitivnog senzora) i meri se otpor cele zapremine polimera. Kao što se može očekivati, prikupljena voda obezbeđuje alternativne provodne puteve i zbog toga otpor opada sa porastom relativne vlažnosti. Otpor se menja za pet redova veličine kada se relativna vlažnost menja od 0 do 100%. Teško je održavati i meriti vrlo veliki otpor koji se javlja pri malim vrednostima relativne vlažnosti. Zbog toga je ovaj tip senzora manje precizan za relativnu vlažnost manju od 20%.

Kao što je prikazano na donjem redu slike 4.4, pri promeni relativne vlažnosti se menja zapremina karbonskog higristora[¶]. U ovakvom higristoru, supstanca čija se zapremina menja je impregnirana finim zrnima ugljenika. Zapremina, ili linearna dimenzija X, raste sa porastom relativne vlažnosti, što dovodi do povećanja rastojanja između čestica ugljenika, što dovodi do povećanja otpora. Karbonski higristori vrlo brzo menjaju svoje karakteristike i koriste se samo u radiosondama gde je trajanje merenja sasvim kratko i gde se senzor ne koristi više puta. Čak i tada, karbonski higristor mora da se čuva u hermetički zatvorenom kontejneru do momenta puštanja sonde i tada izlazni signal mora da se podesi neposredno pre početka merenja.

Električni higrometri su obično malih dimenzija, mogu da budu relativno jeftini i podesni su za daljinska merenja. Potrebna im je kalibracija i neki mogu da imaju značajan temperaturni koeficijent. Neki imaju veliku inerciju i mogu

[¶]Higristori su električni otpornici čija se otpornost menja sa promenom vlažnosti.

Tabela 4.2: Srednje izduženje ljudske kose (u procentima od ukupnog izduženja) u funkciji relativne vlažnosti.

Relativna vlažnost %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Izduženje dlake %	0	21	39	53	64	73	79	85	90	95	100

imati značajan histerezis (videti na strani 17). Inercija takvih senzora raste eksponencijalno sa opadanjem temperature. Kalibracija može da bude promenjena izlaganjem određenim kontaminantima kao što je SO_2. Senzori koji su izloženi visokoj električnoj impedanci[††] na oba kraja skale za vlažnost su posebno osetljivi na izmenu kalibracije izazvanu kontaminantima.

4.3.3.2 Mehanički higrometri

Kod mehaničkih higrometara materijali čija se veličina menja su mehanički povezani sa indikatorom ili pretvaračem. Kao senzorni element su korišćeni ljudska kosa, goldbeater's skin[§§], vuna, pamuk, svila, najlon, papir i drvo. Njihovi osnovni nedostataci su drift, veliki histerezis i velika inercija. Pored nelinearnosti, koja je prikazana u tabeli 4.2, kalibracija higrometra sa ljudskom dlakom može da se promeni kada se higrometar izloži veoma suvom vazduhu (RH ispod 20%).

4.3.3.2.1 Merenje vlažnosti pomoću higrometra sa dlakom Higrometar sa dlakom je instrument koji meri relativnu vlažnost vazduha u procentima. Senzor ovog higrometra je jedna ili više vlasi kose. Vlas kose ima na površini mnogobrojne pore, koje su raspoređene normalno na dlaku. Deo pora je ispunjen pigmentom, a deo vazduhom. Vodena para u vazduhu se kondenzuje u porama i one se pune vodom. Ako je vazduh koji okružuje dlaku zasićen vodenom parom, tada će menisk tečne vode u pori da se zaravni, odnosno krivina meniska ($\frac{1}{R}$) će da postane jednaka nuli. Prema Kelvinovoj formuli, ravnotežni pritisak vodene pare iznad konkavne površine vode (e_s) je manji od ravnotežnog pritiska vodene pare u odnosu na ravnu površinu vode (e_{so})

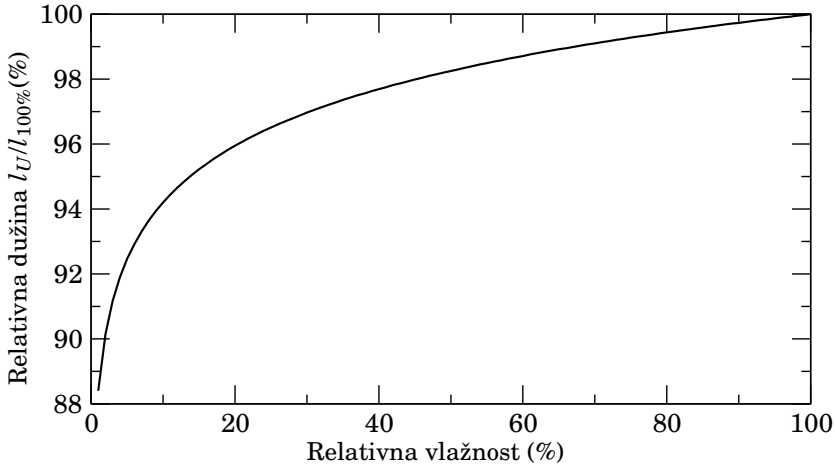
$$\ln \frac{e_s}{e_{so}} = -\frac{\sigma}{nkT}(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) = -\alpha\sigma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}), \tag{4.28}$$

n je broj molekula u jedinici zapremine vode, k Bolcmanova konstanta, T apsolutna temperatura, σ površinski napon vode, R_1 i R_2 odgovarajući poluprečnici krivine i $\alpha = \frac{1}{nkT}$. Prema Laplasu, zbog površinskog napona, pritisak u unutrašnjosti kapljice je veći od pritiska izvan kapljice za $\sigma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$. Odnosno, pritisak u tečnosti konkavne površine u pori dlake je manji od pritiska van tečnosti za $\sigma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$. Ako promenu pritiska u tečnosti ($p_u = p_s + \Delta p$) obeležimo sa Δp, imaćemo da je

$$\Delta p = -\sigma(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}). \tag{4.29}$$

[††]Električna impedanca je mera otpora naizmeničnoj električnoj struji.

[§§]goldbeater - zanatlija koji kuje zlato u zlatne listiće, goldbeater's skin - preparirana spoljašnja opna goveđih velikih creva, koristi se u kovanju zlata za odvajanje listića od metala.



Slika 4.5: Funkcija prenosa za higrometar sa dlakom. Na ordinati je nacrtana relativna dužina vlasi kose, $l(U)$, u odnosu na maksimalnu dužinu, $l(100\%)$. Za modul elastičnosti ljudske kose uzeta je vrednost $E = 5 \times 10^9$ Pa.

Što je relativna vlažnost vazduha manja, veća je krivina $(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})$ tečnosti u kapilari i manji je pritisak u unutrašnjosti tečnosti u pori. Zbog toga se dlaka skuplja sa smanjenjem relativne vlažnosti. Vezu između promene pritiska u tečnosti Δp i promene dužine dlake Δl možemo da napišemo u obliku

$$\Delta p = E\frac{\Delta l}{l}, \tag{4.30}$$

E je Jangov modul elastičnosti[‡‡] dlake i l je dužina dlake pri ravnom menisku vode u njenim porama. Iz jednačina (4.28), (4.29) i (4.30) imamo

$$\ln\frac{e_s}{e_{so}} = \alpha\Delta p = \alpha E\frac{\Delta l}{l}. \tag{4.31}$$

Dužina dlake pri relativnoj vlažnosti manjoj od 100% je $l(U = 100\ \%) + \Delta l$, a relativna promena dužine u funkciji relativne vlažnosti je

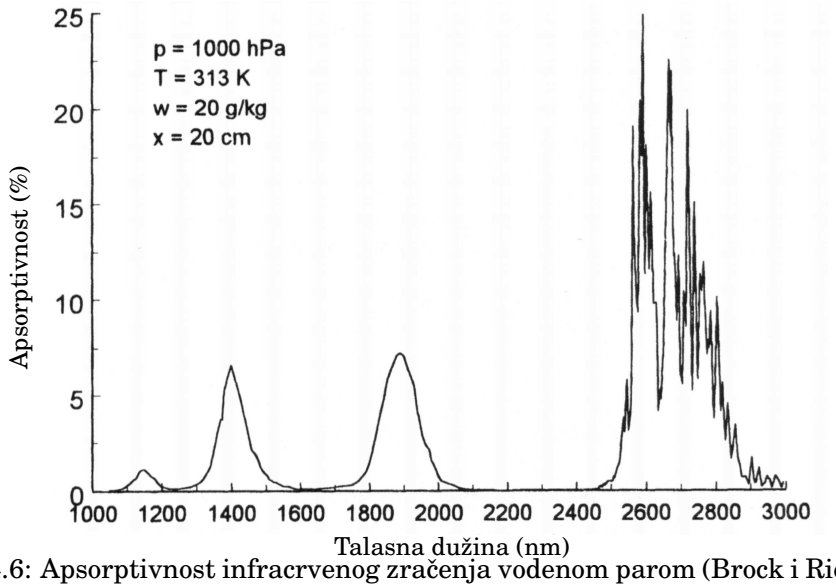
$$\frac{l+\Delta l}{l} = 1 + \frac{1}{\alpha E}\ln\frac{e_s}{e_{so}} = 1 + \frac{1}{\alpha E}\ln U, \tag{4.32}$$

U je relativna vlažnost vazduha definisana kao e_s/e_{so}. Na slici 4.5 prikazana je funkcija prenosa higrometra sa dlakom. Na ordinati je količnik dužine vlasi kose pri relativnoj vlažnosti U (%) i njene maksimalne dužine, pri relativnoj vlažnosti $U = 100\%$

$$\frac{l_U}{l_{100\%}} = \frac{l_{100\%}+\Delta l}{l_{100\%}} = 1 + \frac{\Delta l}{l_{100\%}}. \tag{4.33}$$

Sa ove slike vidimo da se statička osetljivost higrometra sa dlakom, $S = \frac{d(\frac{l_U}{l_{100\%}})}{dU}$, smanjuje sa porastom relativne vlažnosti.

[‡‡]Thomas Young (1773 - 1829) engleski lekar, fizičar, lingvista ... Jangov modul elastičnosti je konstanta proporcionalnosti između sile naprezanja i relativnog izduženja elastičnog tela, ili drugačije rečeno, količnik sile po jedinici površine i relativnog izduženja elastičnog tela.



Slika 4.6: Apsorptivnost infracrvenog zračenja vodenom parom (Brock i Richardson, 2001).

4.3.4 Merenje fizičkih osobina vlažnog vazduha

Sa promenom sadržaja vodene pare u vazduhu menjaju se fizičke osobine vazduha: indeks prelamanja, apsorpcija zračenja, toplotna provodljivost, viskoznost, gustina kao i brzina zvuka.

4.3.4.1 Spektroskopski higrometar

Spektroskopski higrometar meri slabljenje određenih traka u spektru zbog apsorpcije vodenom parom. Ove trake se javljaju uglavnom u ultraljubičastom i infracrvenom delu spektra. Deo dolaznog zračenja koje se propusti kroz sloj atmosfere je dat Berovim zakonom:

$$\tau = \frac{I}{I_o} = \exp(-k_\lambda d_v x), \tag{4.34}$$

x je dužina puta u m, d_v je apsolutna vlažnost u kgm^{-3} redukovana za standardnu atmosferu i k_λ je koeficijent apsorpcije u $\mathrm{m}^2\mathrm{kg}^{-1}$. I_o i I predstavljaju intenzitet zračenja na izvoru i intenzitet zračenja posle prolaska kroz apsorpcioni sloj. Apsorpcija zračenja pri prolasku kroz atmosferu je $a = 1 - \tau$.

Da bi se ova tehnika primenila, potrebno je poznavati I_o ili intenzitet zračenja na izvoru u poznatom opsegu talasnih dužina, dužinu putanje kroz atmosferu, x, i detektovani intenzitet zračenja I. Takođe, treba da znamo koeficijent apsorpcije k_λ za talasnu dužinu emitovanog zračenja. Bilo bi idealno da se koristi opseg talasnih dužina za koje ne postoji drugi apsorber osim vodene pare, da su lako dostupni izvori i detektori takvog zračenja i da postoji transparentni materijal za izradu prozora oko izvora i detektora. U infracrvenom delu spektra traka od oko 1000 nm do 3000 nm je primenljiva, jer u ovoj oblasti postoji malo sunčevog i zemljinog zračenja. Za izradu prozora se može koristiti staklo jer je

transparentno za zračenje do oko 2800 nm. Izvori i detektori su raspoloživi i postoje trake koje snažno apsorbuju zračenje.

Vodena para apsorbuje primarno u različitim linijama. Postoje jake vibraciono-rotacione linije na talasnim dužinama od 2663, 2734, 3163 i 6271 nm. Svaka od ovih linija je pri normalnom pritisku proširena zbog sudaranja i kretanja molekula. Berov zakon može da se primeni na vodenu paru ako je ona jedini apsorbujući gas i ako je širina opsega talasne dužine instrumenta mala u poređenju sa širinom apsorpcionih linija. Prvi uslov može da bude potpuno ispunjen za neke talasne dužine. Drugi uslov bi mogao da bude zadovoljen ako bi se koristio izvor svetlosti uskog opsega, tj. laser.

Laserski higrometri su veoma skupi i nisu sasvim pogodni za terenska merenja. Zbog toga se koriste infracrveni (IR) higrometri sa širokopojasnim izvorom i filteri koji definišu talasni opseg. Karakteristike izvora i detektora se menjaju sa vremenom, a i prozori se mogu zaprljati, što bi moglo da promeni intenzitet svetlosti na izvoru, I_o. Da bi se ova promena kompenzovala, IR higrometri koriste dva opsega, jedan u apsorbujućoj oblasti, npr. 2600 nm, i u referentnoj ili neapsorbujućoj oblasti, npr. oko 2300 nm. Na slici 4.6 je prikazana apsorptivnost zračenja talasnih dužina od 1000 do 3000 nm za dužinu puta od 20 cm i pri odnosu smeše vodene pare od 20 gkg^{-1}.

Šema jednostavnog IR higrometra, koji radi na ovim principima, prikazana je na slici 4.7. Higrometar ima jedan izvor zračenja i jedan detektor zračenja u opsegu od 2300 do 2600 nm. Postoje dva filtera, jedan u referentnom i drugi u apsorbujućem opsegu. Filteri se nalaze na točku koji rotira u ravni normalnoj na zračenje, a napravljen je od materijala koji ne propušta zračenje. Za vreme jedne rotacije točka izlazni signal detektora se sastoji od tri signala, signala V_w koji je dobijen kada je u snopu filter koji propušta apsorbujuće talasne dužine (2600 nm), signala V_d koji se dobija kada ni jedan filter nije u snopu i signala V_r dobijenog pomoću referentnog filtera (2300 nm).

Jednačina prenosa IR higrometra je

$$V_\lambda = I_{o\lambda}\tau_{g\lambda}\tau_{a\lambda}R_\lambda + B, \tag{4.35}$$

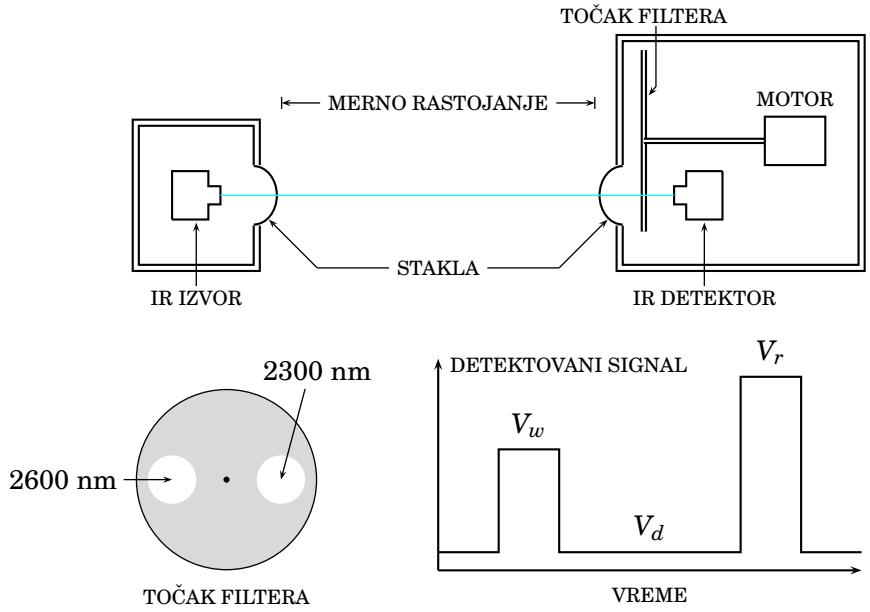
$I_{o\lambda}$ je intenzitet izvora na talasnoj dužini λ (referentni ili apsorbujući opseg), $\tau_{g\lambda}$ je transmitivnost optičkih komponenti (prozori i sočiva), $\tau_{a\lambda}$ je transmitivnost vazduha na mernom rastojanju i R_λ je brzina odziva detektora. Može postojati i neko odstupanje B zbog curenja svetlosti, tamne struje[||] detektora, itd. Talasna dužina i spektralni interval su određeni filterima.

Intenzitet izvora, osetljivost detektora i odstupanje senzora su funkcije vremena, napona i temperature senzora. I transmitivnost optičkih komponenti nije konstantna, već se menja sa vremenom zbog akumulacije prljavštine na prozorima. Normalizovani signal može da se napiše u obliku

$$V_n = \frac{V_w - V_d}{V_r - V_d} = \frac{I_{ow}\tau_{gw}\tau_{aw}R_w}{I_{or}\tau_{gr}\tau_{ar}R_r} = S\tau_{aw}, \tag{4.36}$$

S je statička osetljivost senzora. Normalizovani signal eliminiše drift i nije osetljiv na promenu snage izvora. Potrebno je poznavati temperaturu i pritisak da

[||] Tamna struja je konstantan izlazni signal detektora zračenja u periodu u kom nije izložen zračenju.



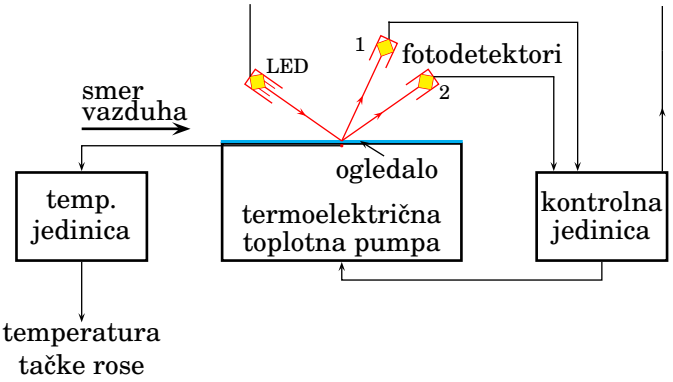
Slika 4.7: Šematski prikaz moguće implementacije jednostavnog IR higrometra.

bi izračunali apsolutnu vlažnost

$$d_v = f(T, p, \tau_{aw}), \tag{4.37}$$

funkcija f se može dobiti teorijski, ali se mora potvrditi kalibracijom.

Lajman-alfa (Lyman-alpha) higrometar koristi kao izvor zračenja Lajman-alfa emisionu liniju atomskog vodonika talasne dužine 121.56 nm (u ultraljubičastom delu spektra). Staklo i mnogi drugi materijali su neprovidni za ovo zračenje, pa se prozori prave od magnezijum-fluorida koji propušta zračenje talasnih dužina od 115 nm do 132 nm. Vodena para je jak apsorber zračenja talasne dužine 121.56 nm, tako da je dovoljno merno rastojanje od 0.2 do 5 cm. Zračenje ove talasne dužine apsorbuju i kiseonik i ozon. Kiseonik je slab apsorber i njegov uticaj se može korigovati koristeći temperaturu i pritisak za procenu njegove gustine. Udeo ozona u apsorpciji zračenja u troposferi je mali. Kod ovog Lajman-alfa higrometra je teško koristiti referentno zračenje za eliminisanje drifta, pa je njegova konstrukcija jednostavnija od IR higrometra (ne postoje točak filtera i motor). Za razliku od izvora i detektora zračenja koji su prilično stabilni, transmitivnost prozora se menja brzinom od 0.5 do 5% po satu merenja zbog interakcije magnezijum-fluorida sa sastojcima vazduha. Ove promene mogu da se koriguju periodičnim poređenjem sa referentnim instrumentom, kao što je higrometar ohlađenog ogledala. Prednost Lajman-alfa higrometra je jednostavnost, mala veličina i mnogo veća brzina u odnosu na IR higrometar ili higrometar ohlađenog ogledala. Lajman-alfa higrometar je pogodan za upotrebu na istraživačkim avionima i za merenja turbulentnih fluktuacija vlažnosti.



Slika 4.8: Šematski prikaz higrometra ohlađenog ogledala. Izvor svetlosti je LED dioda i fotodetektori registruju rasutu (#1) i reflektovanu (#2) svetlost.

4.3.5 Postizanje ravnoteže para-tečnost i para-čvrsto stanje

4.3.5.1 Higrometar tačke rose i tačke slane

Vlažnost u atmosferi može da se odredi hlađenjem površine do postizanja ravnoteže para-tečnost ili para-čvrsto stanje. Osnovne komponente kondenzacionog higrometra, koji se drugačije naziva i higrometar ohlađenog ogledala (chilled-mirror), su sistem za dovod vazduha, reflektujuća površina (ogledalo), sistem za hlađenje i zagrevanje ogledala, sistem za detekciju obrazovanja rose ili slane, senzor za merenje temperature reflektujuće površine i kontrolni sistem za regulisanje temperature i brzine zagrevanja ili hlađenja površine ogledala.

Sistem za dovod vazduha obezbeđuje protok okolnog vazduha uniformnom brzinom i može da sadrži filtere za uklanjanje čestica prašine. Filteri mogu da prouzrokuju greške ako prikupljaju vlagu pa zatim dodatno vlaže vazduh. Sistem za dovod vazduha omogućava mernom sistemu da bude udaljen nekoliko metara od mesta uzorkovanja vazduha. Svi materijali u sistemu za dovod vazduha moraju da budu nehigroskopni.

Temperatura ogledala se može kontrolisati i pomoću njega se može detektovati formiranje rose ili slane. Ogledalo je obično napravljeno od metala.

Ogledalo se greje i hladi pomoću toplotne pumpe koja radi na principu termopara koristeći Peltijerov efekat [¶]. Ovo je kompaktan sistem i potpuno je reverzibilan (isti sistem može da greje i da hladi ogledalo). Brzina kojom se ogledalo greje ili hladi određuje frekvenciju odziva sistema.

Formiranje rose ili slane na ogledalu se detektuje optički LED[¶¶] diodom i jednim ili više fotodetektora koji mere promenu količine rasute svetlosti kad se rosa ili slana formiraju na ogledalu. Na slici 4.8 su prikazana dva fotodetektora. Detektor dva će primati svetlost koja se reflektuje od čiste površine ogledala, a detektor jedan će biti osvetljen samo kada se svetlost rasipa od površine sa rosom

[¶]Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845) francuski fizičar. Peltijerov efekat - pri proticanju struje kroz termopar, jedan spoj termopara će se zagrevati a drugi će se hladiti. Ako se smer struje promeni, spoj koji je prethodno zagrevan će se hladiti, a prethodno hlađen će se zagrevati.

[¶¶]Light emitting diode - dioda koja emituje svetlost je posebna vrsta poluprovodničke diode koja emituje svetlost kada kroz nju teče struja.

ili slanom. U ovoj šemi, kontrolna jedinica koristi razliku količine svetlosti koju prime ovi detektori da izračuna da li je potrebno hladiti ili zagrevati ogledalo. U šemi sa jednim fotodetektorom, kontrolna jedinica koristi intenzitet dobijenog signala.

Senzor za temperaturu, obično termistor ili RTD, je ugrađen neposredno ispod površine ogledala, na način koji ne menja optičke ili termičke karakteristike ogledala. On mora da bude u centru ogledala i veoma blizu površine da bi se minimizirali gradijenti temperature između senzora i aktivne površine.

Kontrolni sistem prima signale od optičkog detektora, i ponekad od senzora za temperaturu, i kontroliše struju kroz toplotnu pumpu. Kontrolni sistem mora da reguliše temperaturu ogledala do tačke na kojoj rosa ili slana upravo počinju da se formiraju. Ovo može da se uradi održavanjem uniformne debljine rose ili slane. Takođe, kontrolni sistem treba da reguliše brzinu zagrevanja ili hlađenja tako da spreči precenjivanje i da uvek brzo prati promene okolne vlažnosti.

Metod tačke rose je fundamentalna tehnika za određivanje vlažnosti. Higrometri ovog tipa su osetljivi na nekoliko činilaca zbog kojih je neophodna kalibracija.

Higrometrom ohlađenog ogledala mogu se vršiti kontinuarna, automatska merenja visoke tačnosti. Temperaturni interval u kome ovaj higrometar može da radi je od $-70°$C do $60°$C. Moguće je postići preciznost od $0.4°$C za temperaturu tačke rose kada nema zamrzavanja, do $2°$C za temperaturu tačke slane od $-70°$C u slučaju konstantne vlažnosti vazduha. Higrometri ohlađenog ogledala po pravilu imaju sporu reakciju i nisu pogodni za upotrebu na avionima u situacijama kada pritisak vodene pare brzo fluktuira (pri ulasku u oblak).

Namena ovog instrumenta je da meri sadržaj vodene pare u slobodnom vazduhu. Zbog toga merno mesto treba da se nalazi sa privetrene strane u odnosu na izvore pare, kao što su prskalice travnjaka ili rashladni tornjevi. Takođe, instrument treba da bude udaljen od popločanih mesta koja mogu da budu vlažna i daleko od zgrada i drveća. Prašina i čestice soli nepovoljno utiču na instrument, pa je suštinski važno da se ogledalo redovno čisti.

4.3.5.2 Zasićeni rastvor soli

Ravnotežni pritisak vodene pare iznad ravne površine zasićenog rastvora soli je funkcija temperature rastvora i pritiska vazduha. Ravnotežni pritisak vodene pare iznad ravne površine zasićenog vodenog rastvora litijum-hlorida, e_{sli}, prikazan je na slici 4.9. Za temperaturu zasićenog rastvora LiCl u intervalu od 0 do $100°$C ravnotežni pritisak vodene pare je izračunat na osnovu jednačine (Zeng i Zhou, 2006)

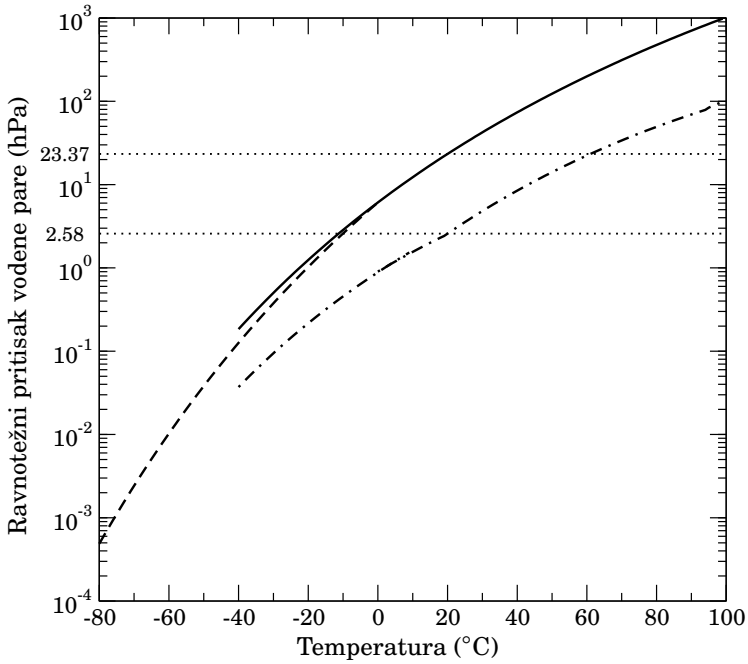
$$\ln e_{sli} = a + \frac{b}{T} + c \ln T, \tag{4.38}$$

e_{sli} je u kPa, T u K, a koeficijenti a, b i c su dati u tabeli 4.3. Za temperaturu u intervalu od -40 do $0°$C ravnotežni pritisak e_{sli} je

$$\log_{10} e_{sli} = 5.3 - \frac{1090}{199 + T}, \tag{4.39}$$

e_{sli} je u mmHg, T u °C (Morillon i dr., 1999).

Na temperaturi od 20°C ravnotežna relativna vlažnost zasićenog rastvora LiCl je 11.04 %.



Slika 4.9: Ravnotežni pritisak zasićene vodene pare iznad ravne površine zasićenog rastvora litijum-hlorida (linija crta-tačka-crta), ravne površine čiste vode (puna linija) i iznad leda (isprekidana linija).

PRIMER 4.2 *Ako je temperatura zasićenog rastvora LiCl jednaka* 20°C *i ako je rastvor u ravnoteži sa vlažnim vazduhom iste temperature, tada je* e_{sli} *jednak stvarnom pritisku vodene pare u vazduhu, e, pa je relativna vlažnost vazduha jednaka*

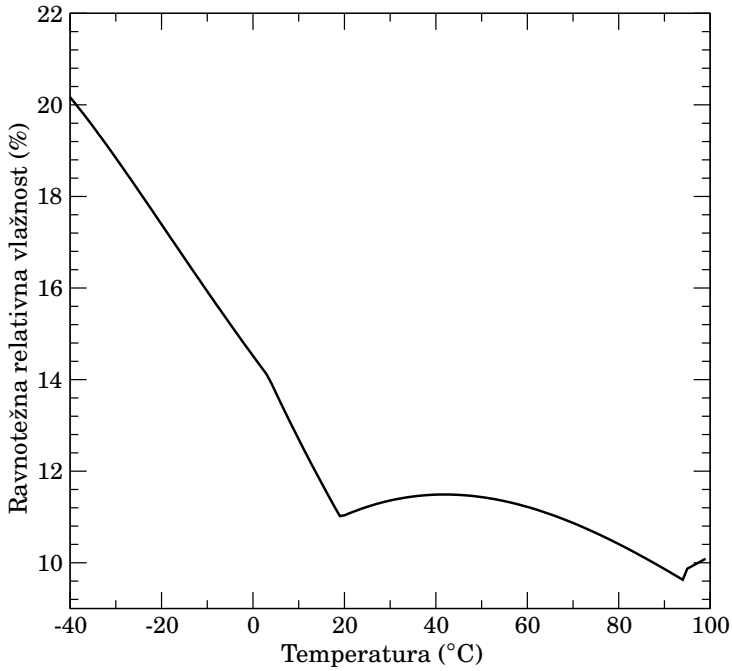
$$U = \frac{e}{e_s} = \frac{e_{sli}}{e_s} = \frac{2.58 \text{ mb}}{23.37 \text{ mb}} = 11.04 \text{ \%}.$$

Rastvor litijum-hlorida u vodi provodi električnu struju, a električna provodljivost raste sa povećanjem sadržaja tečne vode u rastvoru.

Uređaj za merenje vlažnosti vazduha koji radi na principu uspostavljanja ravnoteže između vodene pare u vazduhu i zagrejanog vodenog rastvora zasićene soli naziva se ***kondenzacioni higrometar*** zagrejanog litijum hlorida ili ***vlažna ćelija*** (*eng. dewcell*). Senzor vlažne ćelije se sastoji od cevi u kojoj se nalazi

Tabela 4.3: Koeficijenti standardne krive ravnotežnog pritiska vodene pare za zasićeni rastvor $LiCl \cdot nH_2O$ u funkciji temperature (Zeng i Zhou, 2006).

Faza	e_{sli}	T (K)
$LiCl \cdot 2H_2O$	$\ln e_{sli} = 133.6116 - 9278.12/T - 18.19053 \ln T$	273-293
$LiCl \cdot H_2O$	$\ln e_{sli} = 149.41106 - 11419.74114/T - 19.68268 \ln T$	293-368
LiCl	$\ln e_{sli} = 70.83197 - 8611.23808/T - 7.66919 \ln T$	368-453



Slika 4.10: Ravnotežna vrednost relativne vlažnosti za zasićeni rastvor LiCl, u funkciji temperature.

otporni termometar. Spoljašnja površina cevi je obložena trakom od staklenih vlakana nakvašenih vodenim rastvorom litijum-hlorida.

Osim u uslovima ekstremno niske vlažnosti, pritisak pare u vazduhu je veći od ravnotežnog pritiska pare iznad rastvora litijum-hlorida na temperaturi okoline. Zbog toga će se vodena para kondenzovati na rastvoru, povećaće se provodljivost rastvora, a sa njom i brzina zagrevanja rastvora. Kako se rastvor zagreva električnom strujom, njegova temperatura će da postane veća od ravnotežne temperature, pa će voda da isparava iz rastvora i provodljivost rastvora će da se smanjuje, a sa njom i temperatura rastvora.

Postoji radna ravnotežna temperatura instrumenta, koja zavisi od pritiska okolne vodene pare. Ravnotežna relativna vlažnost vazduha je izračunata na osnovu podataka za e_{sli} i e_{sw} i prikazana je na slici 4.10. Iznad ravnotežne temperature isparavanje povećava koncentraciju rastvora, zbog toga se smanjuje jačina električne struje i zagrevanje, pa će odvođenje toplote da dovede do smanjivanja temperature rastvora. Ispod ravnotežne temperature, kondenzacija će da smanji koncentraciju rastvora, povećaće se električna struja i zagrevanje i povećaće se temperatura rastvora. Na ravnotežnoj temperaturi, kondenzacija i isparavanje su isti, tj. pritisak okolne pare je jednak ravnotežnom pritisku vodene pare iznad rastvora.

Neki od faktora koji menjaju karakteristike vlažne ćelije su:

- Vlažna ćelija može da radi u temperaturnom intervalu od -30 do 100°C, pod uslovom da je relativna vlažnost u intervalu od 100% do ravnotežne vrednosti za zasićeni rastvor LiCl, koja je prikazana na slici 4.10 (11% na 50°C, 15% na 0°C).

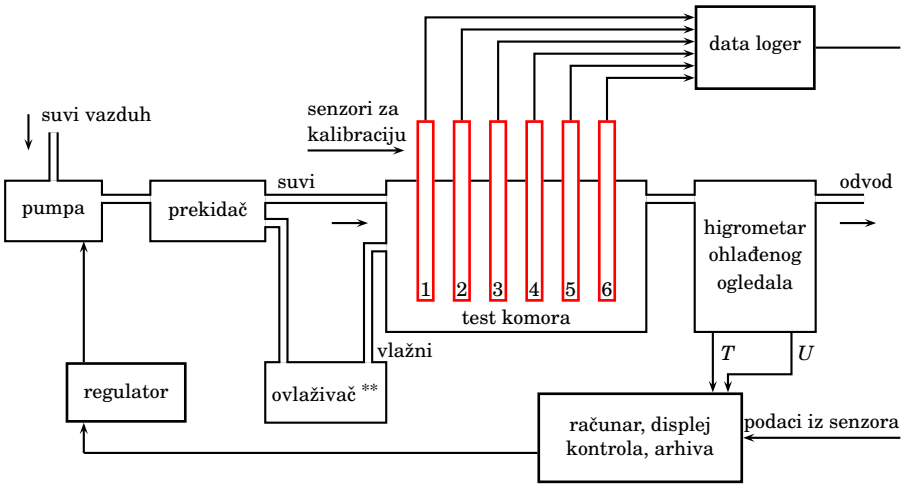
- Vlažna ćelija treba da bude zaštićena od jake ventilacije, koja može da uzrokuje veliki gubitak toplote i tako smanji njenu temperaturu i da pogrešnu vrednost.
- Nestanak struje može da izazove hlađenje i zasićenje tečnom vodom koja može da spere so iz krpice.
- Brzina reagovanja instrumenta zavisi od brzine kojom se vlažna ćelija greje ili hladi.

4.4 Kalibracija senzora za vlažnost vazduha

Sistem za kalibraciju sorpcionih senzora je prikazan na slici 4.11. Prikazan je niz od šest senzora koji se nalaze u test komori sa poznatom temperaturom i relativnom vlažnošću. Vlažnost u komori se menja kontrolisanim mešanjem suvog i zasićenog vazduha. Suvi vazduh može da se dobije pumpanjem vazduha kroz cev sa apsorberom vlage. Skretnica (prekidač) se koristi za usmeravanje dela tog vazduha kroz ovlaživač, gde se vazduh zasiti vodenom parom. Ako je suvi vazduh potpuno suv ($e = 0$) i zasićeni vazduh potpuno zasićen ($e = e_s$), i ako je temperatura u sistemu konstantna, relativna vlažnost u test komori će biti

$$U = \frac{V_s}{V_s + V_d} \cdot 100\ (\%), \tag{4.40}$$

V_s je zapremina zasićenog vazduha i V_d je zapremina suvog vazduha koji se upumpavaju u komoru u jedinici vremena. Računar je programiran da generiše kontrolisane vremenske sekvence vlažnosti u test komori koristeći ovu relaciju. Relativna vlažnost u komori se može menjati u koracima od skoro 0 % do 100 % i obrnuto. Vlažnost se održava na konstantnom nivou u svakom koraku dok se senzori ne ustale na novoj vrednosti.



Slika 4.11: Sistem za kalibraciju senzora za vlažnost vazduha. Željena vlažnost se generiše mešanjem suvog i zasićenog vlažnog vazduha.

Tabela 4.4: Vrednosti ravnotežne relativne vlažnosti za izabrane vodene rastvore soli za temperature 20, 25 i 30°C.

So	20°C	25°C	30°C	Formula
Litijum-hlorid	11.1	11.3	11.3	$LiCl$
Kalijum-acetat	23.1	22.5	21.6	$KC_2H_3O_2$
Magnezijum-hlorid	33.1	32.8	32.4	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Kalijum-karbonat	43.2	43.2	43.2	K_2CO_3
Magnezijum-nitrat	54.4	52.9	51.4	$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$
Natrijum-hlorid	75.5	75.3	75.1	$NaCl$
Kalijum-hlorid	85.1	84.3	83.6	KCl
Barijum-hlorid	91.0	90.0	89.0	$BaCl_2 \cdot H_2O$
Kalijum-nitrat	94.6	93.6	92.3	KNO_3
Kalijum-sulfat	97.6	97.3	97.0	K_2SO_4

Regulator koristi određene pretpostavke koje nikada ne mogu u potpunosti da budu ispunjene. Zbog toga, vazduh koji se ispušta iz test komore prolazi kroz higrometar ohlađenog ogledala, pomoću koga se meri temperatura tačke rose. Računar koristi izmerenu T_d i vrednost T u komori za računanje relativne vlažnosti. Ova vrednost se koristi za kalibrisanje senzora. Jedan od najjednostavnijih metoda za kalibrisanje sorpcionih senzora za vlažnost je izlaganje senzora u zatvorenom sudu sa vodenim rastvorom soli. Rastvori soli koji se mogu koristiti za kalibraciju senzora prikazani su u tabeli 4.4. Tačnost merenja veoma zavisi od mogućnosti postizanja i održavanja senzora i rastvora soli na istoj i poznatoj temperaturi. Ova temperatura mora da bude konstantna sa tačnošću u granicama ± 0.1°C.

[**] Ovlaživač (*eng. bubbler*) je rezarvoar sa tečnošću u koji se kroz cev sa otvorom pri dnu dovodi gas, a odvodi se kroz cev sa otvorom pri vrhu rezervoara. Mehurići gasa se na putu kroz tečnost, od dna do vrha rezervoara, zasite parom tečnosti.

Glava 5

Merenje pritiska

Ovo poglavlje se odnosi na merenje statičkog pritiska koji vrši atmosfera. Statički pritisak je sila po jedinici površine koja bi delovala na neku površinu u odsustvu kretanja vazduha. To je izotropska, skalarna veličina. Dinamički pritisak je sila po jedinici površine izazvana kretanjem vazduha. To je vektorska veličina koja deluje u smeru vektora vetra.

Atmosfera vrši pritisak na površinu na Zemlji koji je jednak težini vertikalnog stuba vazduha jediničnog poprečnog preseka. Kako je vazduh fluid, ovaj pritisak se vrši jednako u svim pravcima. Statički pritisak na površini Zemlje ili težina jediničnog stuba vazduha sa osnovom na površini Zemlje i visinom do vrha atmosfere je

$$p(0) = \int_0^\infty g(z)\rho(z)dz. \tag{5.1}$$

U ovoj jednačini $g(z)$ i $\rho(z)$ su ubrzanje sile zemljine teže i gustina vazduha na visini z iznad nivoa mora. Jedinica za pritisak u SI sistemu je paskal (Pa). U meteorologiji se kao jedinica za pritisak obično koristi milibar (mb) i 1 mb = 100 Pa = 1 hPa.

Kada vazduh struji ka i oko barometra ili objekta u kojem se nalazi barometar, dinamički pritisak produkuje grešku

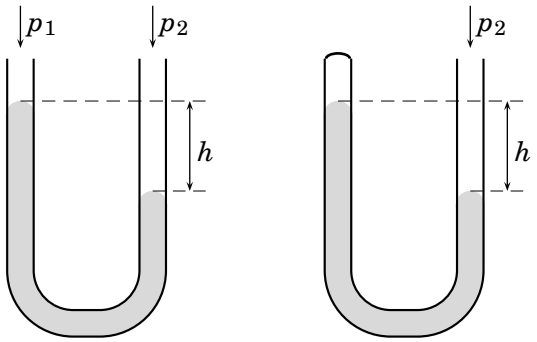
$$\Delta p = \frac{1}{2} C \rho V^2 \tag{5.2}$$

Δp je dinamički pritisak, ρ je gustina vazduha, V brzina vetra i C je koeficijent koji može biti pozitivan i negativan sa apsolutnom vrednošću približno jednakoj jedinici.

Merenje pritiska može da bude direktno merenje sile po jedinici površine, ili težine jediničnog stuba atmosfere, i indirektno, kao što je merenje temperature ključanja tečnosti izložene atmosferskom pritisku.

5.1 Direktno merenje pritiska

Direktno merenje pritiska se obično zasniva na uravnotežavanju atmosferskog pritiska težinom stuba žive ili elastičnim silama u aneroidnim barome-



Diferencijalni pritisak Apsolutni pritisak ($p_1 = 0$)

Slika 5.1: Šematski prikaz diferencijalnog i apsolutnog manometra.

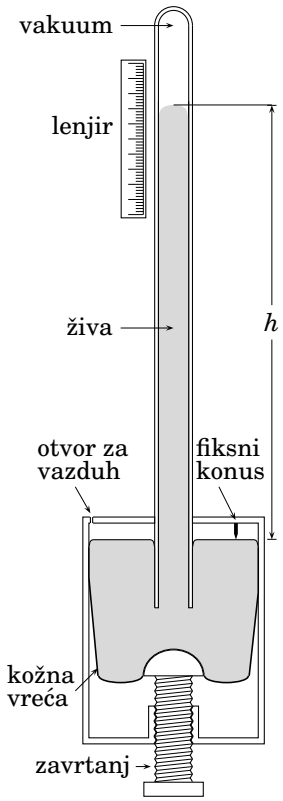
trima.

5.1.1 Živini barometri

Najjednostavniji oblik živinog senzora za pritisak (barometra) je manometar. Dve vrste manometara prikazane su na slici 5.1. Ako su oba kraja manometra otvorena, on meri razliku pritiska na njima. Ako je jedan kraj zatvoren i izvučen vazduh iz tog dela, tada manometar meri apsolutni pritisak. Manometar nije pogodan za korišćenje jer se moraju izmeriti visine živinog stuba u oba kraja cevi i naći njihova razlika da bi se dobio neobrađeni izlaz h.

Unapređena verzija živinog barometra omogućava visoku preciznost i jednostavnu kalibraciju i u Fortenovoj (Fortin) varijanti je donekle prenosiv. Ovakav barometar ima izvanredno dugotrajnu stabilnost. Međutim, teško je automatizovati očitavanje i nije pogodan za terenska merenja. Pored toga, živa može da izazove ozbiljne zdravstvene probleme. Jednostavan živin barometar, prikazan na slici 5.2, sastoji se od staklene cevi delimično napunjene živom, koja je zatopljena na vrhu i rezervoara sa živom na dnu. U gornjem delu staklene cevi je skoro potpuni vakuum. Pritisak u ovom delu cevi je zbir parcijalnog pritiska zasićene živine pare i pritiska koji potiče od preostalog vazduha. U dobro održavanom barometru ovaj pritisak je zanemarljiv (< 10 Pa), pa se može smatrati da postoji vakuum. Kako živa ne kvasi staklo njena slobodna površina u cevi je zakrivljena. Ova zakrivljena površina se naziva menisk (meniskus).

Težina živinog stuba uravnotežava atmosferski pritisak. Visina stuba u odnosu na površinu žive u rezervoaru se meri pomoću ugrađene skale. Pre očitavanja visine, nivo žive u rezervoaru se podesi tako da dodiruje vrh referentnog konusa (fiducijalna tačka). Tada se pokretni pokazivač ručno podesi do vrha živinog stuba. Zbog preciznijeg očitavanja, na glavnu skalu je postavljen nonijus (vernie). U primeru koji je prikazan na slici 5.3, glavna skala je obeležena u jedinicama hPa (mb) sa najmanjim podeokom od 1 hPa. Vernieova skala ima 20 podeoka i dozvoljava merenje sa tačnošću od 0.05 hPa. U primeru na levoj strani slike 5.3 na glavnoj skali je očitana vrednost 930 mb, a nulta linija nonijusa se poklapa sa linijom na glavnoj skali pa je rezultat merenja $930 + 0 \times 0.05 = 930$ hPa. U primeru u sredini slike očitana vrednost na glavnoj skali je između 930 i 931, a 15-a



Slika 5.2: Šematski prikaz barometra sa živom.

linija na nonijusu se poklapa sa linijom na glavnoj skali, pa je izmerena vrednost $930 + 15 \times 0.05 = 930.75$ hPa. Na primeru sa desne strane iste slike na glavnoj skali je vrednost između 931 i 932, a 10-a linija na nonijusu se poklapa sa linijom na glavnoj skali, pa je izmerena vrednost pritiska $931 + 10 \times 0.05 = 931.5$ hPa.

Živa se koristi kao barometarski fluid iz sledećih razloga:

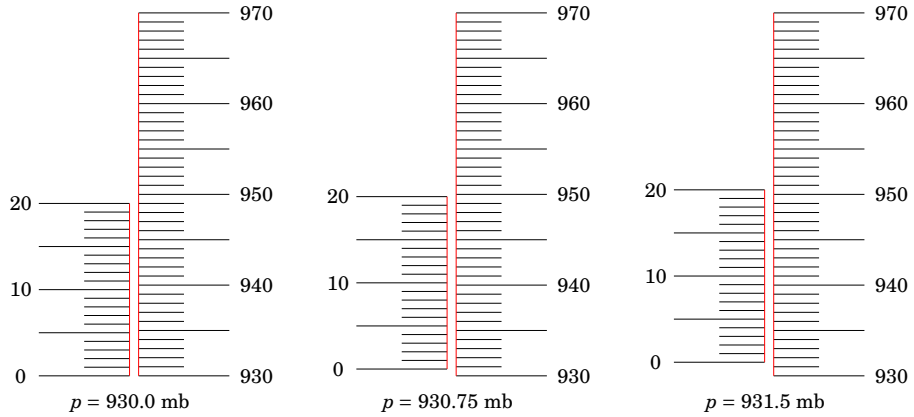
a) ima veliku gustinu (13.595 kgm^{-3}na 0°C) pa stub tečnosti može imati prihvatljivu visinu (oko 760 mm);

b) ima mali pritisak zasićene pare (0.021 Pa na 0°C) i zbog toga mali uticaj na vakuum na vrhu živinog stuba;

c) može se dobiti u čistom stanju i hemijski je stabilna, mada je para žive otrovna i zbog toga se pri radu sa njom mora krajnje pažljivo postupati;

d) živa je tečnost u širokom temperaturnom opsegu (−38.87°C do 356.58°C) koji uključuje sobnu temperaturu.

Kalibraciona jednačina za živin barometar je $p_1 = \rho_m g h$, p_1 je procenjeni pritisak određen iz izmerene vrednosti visine h, ρ_m je gustina žive, g je ubrzanje sile zemljine teže i h je visina živinog stuba u odnosu na nivo žive u rezervoaru. Težina stuba žive visine h i površine poprečnog preseka A_c je $\rho_m g h A_c$, pa je pritisak ovakvog stuba žive (težina po jedinici površine) $\rho_m g h$. Jednačina transfera (pokazuje sirovi izlaz senzora, h, u funkciji merene veličine, p) je $h = \frac{p}{\rho_m g}$.



Slika 5.3: Ilustracija primene Vernieove (Nonijusove) skale u barometrima sa tečnošću.

Statička osetljivost je $\frac{dh}{dp} = \frac{1}{\rho_m g}$. Da bi povećali statičku osetljivost morali bi da zamenimo živu sa barometarskim fluidom koji ima željene osobine ali manju gustinu. U tom slučaju bi barometar bio duži.

Glavni izvori grešaka za živin barometar su:

a) Dinamički pritisak vetra se superponira na statički pritisak i može da izazove značajnu grešku od nekoliko milibara (pozitivnu ili negativnu). Živini barometri se obično montiraju u zgradi gde se uticaj vetra na pritisak uglavnom javlja zbog otvaranja vrata ili prozora ili zbog rada ventilacionog sistema. Ponekad je, radi smanjenja osetljivosti na pravac i brzinu vetra, neophodno da se napravi poseban otvor kroz zgradu, tzv. statički port.

b) Gustina žive je funkcija temperature. Pored toga i dužina pričvršćene skale zavisi od temperature. Ovi temperaturni efekti moraju da se kompenzuju merenjem temperature barometra i računanjem korekcije za temperaturu, C_t.

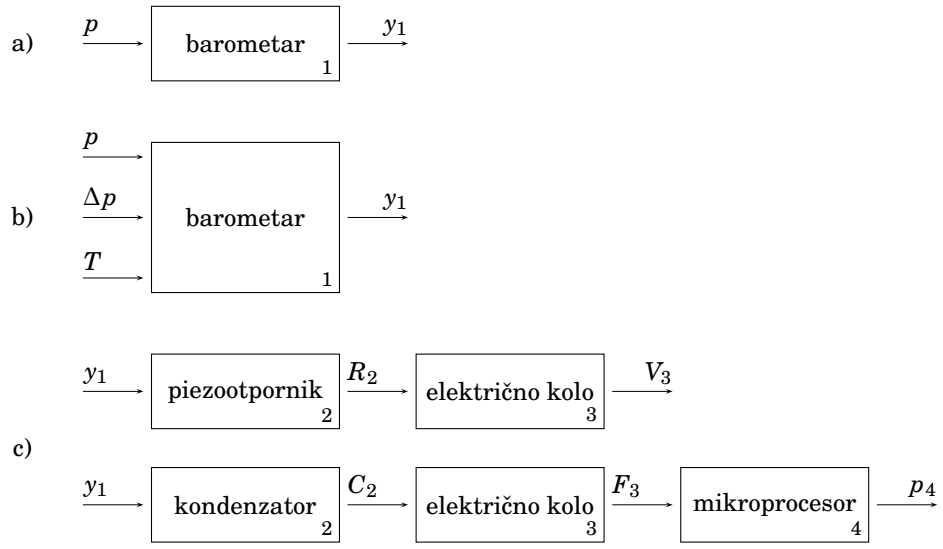
c) Kako je atmosferski pritisak uravnotežen težinom stuba žive, mora biti poznata tačna vrednost ubrzanja sile zemljine teže na mestu gde se nalazi barometar (lokalna vrednost g-a) i računata gravitaciona korekcija, C_g.

d) Prisustvo gasa u cevi iznad žive će izazvati grešku pri merenju. Pare žive ne mogu značajno narušiti pretpostavljeni vakuum jer je pritisak zasićene pare žive mali. Međutim, prisustvo vazduha ili vodene pare može biti izvor greške.

e) U barometarskim cevima malog prečnika površinski napon žive će izazvati smanjenje visine živinog stuba. U cevi unutrašnjeg prečnika od 5 mm greška će biti oko 200 Pa, a za cev prečnika 13 mm greška će biti 27 Pa. Korekcija ove greške je obično uključena u indeksnu korekciju.

f) Barometar mora da stoji vertikalno.

g) Nečistoće bilo koje vrste menjaju gustinu fluida i zbog toga očitavanje. Oksidacija žive dovodi do promene efekata površinskog napona. Zaprljana živa ima zamućenu površinu. Čista živa ima sjajnu glatku površinu. Ovakva površina olakšava podešavanje referentne tačke i očitavanje.



Slika 5.4: Funkcionalni dijagram barometra.

Funkcionalni dijagram živinog barometra je prikazan na slici 5.4. Na slici pod (a) merena veličina (primarni signal ili input) je statički pritisak, a na slici pod (b) pored merene veličine postoje i neželjeni sekundarni inputi, dinamički pritisak i temperatura, koji dovode do greške merenja. Neobrađeno očitavanje barometra p_1 se konvertuje u stanični pritisak p_s primenom indeksne korekcije, korekcije za temperaturu i gravitacione korekcije. Korekciju definišemo kao vrednost koju treba dodati izmerenoj da bi dobili tačnu vrednost (tačna vrednost = izmerena vrednost + korekcija), a grešku kao razliku izmerene i tačne vrednosti (greška = izmerena vrednost - tačna vrednost). Prema tome

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + C_x + C_t, \\ p_s &= p_2 + C_g. \end{aligned} \tag{5.3}$$

Indeksna korekcija C_x je dobijena poređenjem sa referentnim barometrom. Ako indeksna korekcija nije data, pretpostavlja se da je jednaka nuli. Korekcija za temperaturu se može dobiti na osnovu poznavanja koeficijenata zapreminskog širenja žive, β i linearnog širenja skale, α. Promena zapremine žive, dV, pri promeni temperature, dT, može da se napiše u obliku

$$dV = \beta V_o dT, \tag{5.4}$$

V_o je zapremina žive na temperaturi T_o. Integraljenjem (5.4) dobijamo

$$\int_{V_o}^{V_t} dV = \beta V_o \int_{T_o}^{T} dT \quad \Rightarrow \quad V_t = V_o + \beta V_o \underbrace{(T - T_o)}_{t(^\circ\mathrm{C})} \quad \Rightarrow \quad V_t = V_o(1 + \beta t). \tag{5.5}$$

Ako je isti atmosferski pritisak uravnotežen živinim stubom visine H_t na temperaturi t i H_o na $t = 0^\circ$C

$$p = \rho_t g H_t = \rho_o g H_o, \tag{5.6}$$

tada je

$$H_o = \frac{\rho_t}{\rho_o} H_t = \frac{m/V_t}{m/V_o} H_t = \frac{V_o}{V_t} H_t = \frac{1}{1+\beta t} H_t \approx (1-\beta t) H_t. \tag{5.7}$$

Kada uzmemo u ubzir i promenu dužine skale sa promenom temperature biće

$$H_o \approx [1-(\beta-\alpha)t] H_t. \tag{5.8}$$

ili

$$H_o = H_t \underbrace{-(\beta-\alpha)t H_t}_{C_t}.$$

C_t je korekcija za temperaturu i jednaka je

$$C_t = -H_t(\beta-\alpha)t.$$

Kako je H_t neobrađeni izlaz barometra ($H_t = p_1$), korekcija pritiska za temperaturu je

$$C_t = -p_1(\beta-\alpha)t. \tag{5.9}$$

Ako je skala barometra izrađena od mesinga, i ako uzmemo vrednosti koeficijenata širenja žive $\beta = 1.818 \times 10^{-4}\ ^\circ\mathrm{C}^{-1}$ i mesinga $\alpha = 1.84 \times 10^{-5}\ ^\circ\mathrm{C}^{-1}$ (Lide, 2007), korekcija za temperaturu će biti

$$C_t = -1.634 \times 10^{-4} p_1 t. \tag{5.10}$$

Stub žive konstantne dužine će da uravnotežava različit pritisak, zavisno od vrednosti sile zemljine teže na mestu na kom se barometar nalazi

$$p = \rho g_r H_r = \rho g_{\varphi h} H_{\varphi h}. \tag{5.11}$$

$H_{\varphi h}$ je visina stuba žive na geografskoj širini φ i nadmorskoj visini h, a $g_{\varphi h}$ je ubrzanje sile zemljine teže na tom mestu. Ako pretpostavimo da je Zemlja sfernog oblika, ubrzanje sile zemljine teže je

$$g_{\varphi h} = g^* - \Omega^2 r \cos^2\varphi, \tag{5.12}$$

$r = R_z + h$, $R_z = 6371$ km je srednji poluprečnik Zemlje, h je nadmorska visina, g^* je gravitaciono ubrzanje, koje je funkcija nadmorske visine i Ω je ugaona brzina Zemlje. Gravitaciono ubrzanje Zemlje može da se napiše kao

$$g^* = \frac{GM}{r^2} = \frac{GM}{(R_z+h)^2} = \frac{GM}{R_z^2(1+\frac{h}{R_z})^2} \approx \underbrace{\frac{GM}{R_z^2}}_{g_o^*}(1-\frac{2h}{R_z}), \tag{5.13}$$

$G = 6.67428 \times 10^{-11}\ \mathrm{Nm^2kg^{-2}}$ je gravitaciona konstanta i $M = 5.9737 \times 10^{24}$ kg je masa Zemlje. Na polu ($\varphi = 90^\circ$, $h = 0$) ne postoji centrifugalna sila, pa je $g_{90} = g_o^*$. Na ekvatoru ($\varphi = 0^\circ$, $h = 0$)

$$g_0 = g_o^* - \Omega^2 R_z = g_{90} - \Omega^2 R_z \quad \Rightarrow \quad \Omega^2 R_z = g_{90} - g_0. \tag{5.14}$$

Ako iskoristimo trigonometrijski identitet $\cos^2\varphi = \frac{1+\cos 2\varphi}{2}$ i (5.14), ubrzanje sile zemljine teže na geografskoj širini φ i nadmorskoj visini h možemo napisati kao

$$g_{\varphi h} = g_{90}(1-\frac{2h}{R_z})-(g_{90}-g_0)\frac{1+\cos 2\varphi}{2} = g_{90}-g_{90}\frac{2h}{R_z}-\frac{g_{90}-g_0}{2}-\frac{g_{90}-g_0}{2}\cos 2\varphi$$

ili

$$g_{\varphi h} = \frac{g_{90}+g_0}{2}-\frac{g_{90}-g_0}{2}\cos 2\varphi - g_{90}\frac{2h}{R_z}. \tag{5.15}$$

Na geografskoj širini od 45° na nivou mora ($h = 0$), ubrzanje sile zemljine teže je

$$g_{45} = \frac{g_{90}+g_0}{2}-\frac{g_{90}-g_0}{2}\cos 90 = \frac{g_{90}+g_0}{2}.$$

Koristeći izmerene vrednosti na ekvatoru i polu ($g_0 = 9.780\ \mathrm{ms}^{-2}$, $g_{90} = 9.832\ \mathrm{ms}^{-2}$), dobijamo

$$g_{45} = \frac{9.832+9.780}{2} = 9.806\ \mathrm{ms}^{-2}.$$

Jednačinu (5.15) možemo da prepišemo u obliku

$$\begin{aligned} g_{\varphi h} =& g_{45}(1-\frac{g_{90}-g_0}{2g_{45}}\cos 2\varphi - \frac{g_{90}}{g_{45}}\frac{2h}{R_z}) \\ =& g_{45}(1-2.651\times 10^{-3}\cos 2\varphi - 3.1475\times 10^{-7}h) \\ =& g_{45}(1-2.651\times 10^{-3}\cos 2\varphi) - 3.0865\times 10^{-7}h. \end{aligned} \tag{5.16}$$

Ako bi referentna vrednost ubrzanja sile zemljine teže, g_r, bila g_{45} (što nije), i ako posmatramo promenu veličine g zbog promene geografske širine i nadmorske visine, iz jednačine (5.11) bi imali

$$H_r = \frac{g_{\varphi h}}{g_{45}}H_{\varphi h} = H_{\varphi h}(1-\frac{g_{90}-g_0}{2g_{45}}\cos 2\varphi - \frac{g_{90}}{g_{45}}\frac{2h}{R_z})$$

ili

$$H_r = H_{\varphi h}\underbrace{-H_{\varphi h}\frac{g_{90}-g_0}{2g_{45}}\cos 2\varphi}_{C_{g\varphi}}\underbrace{-H_{\varphi h}\frac{g_{90}}{g_{45}}\frac{2h}{R_z}}_{C_{gh}}.$$

Gravitaciona korekcija zbog geografske širine bi bila

$$C_{g\varphi} = -H_{\varphi h}\frac{g_{90}-g_0}{2g_{45}}\cos 2\varphi = -H_{\varphi h}\cdot 2.651\times 10^{-3}\cos 2\varphi,$$

a gravitaciona korekcija zbog nadmorske visine

$$C_{gh} = -H_{\varphi h}\frac{g_{90}}{g_{45}}\frac{2h}{R_z} = -H_{\varphi h}\cdot 3.1475\times 10^{-7}h.$$

Tačna vrednost pritiska bi bila

$$H_r = H_{\varphi h}(1-2.651\times 10^{-3}\cos 2\varphi - 3.1475\times 10^{-7}h)$$

ili

$$p_s = p_2(1 - 2.651 \times 10^{-3} \cos 2\varphi - 3.1475 \times 10^{-7} h). \tag{5.17}$$

Referentna (standardna) vrednost ubrzanja sile zemljine teže, prema WMO (2006), je $g_r = 9.80665$ ms^{-2}. Takođe, prema WMO (2006), vrednost lokalnog ubrzanja sile zemljine teže se računa u dva koraka. Prvo se računa ubrzanje sile zemljine teže na geografskoj širini φ, na nivou mora,

$$g_\varphi = 9.80616(1 - 2.6373 \times 10^{-3} \cos 2\varphi + 5.9 \times 10^{-6} \cos^2 2\varphi), \tag{5.18}$$

a zatim se uključuje uticaj nadmorske visine

$$g_{\varphi h} = g_\varphi - 3.086 \times 10^{-6} h + 1.118 \times 10^{-6}(h - h') \tag{5.19}$$

h je nadmorska visina u metrima i h' je srednja nadmorska visina u krugu poluprečnika 150 km. Jednačina (5.19) može da se primeni za stanicu na kopnu, pod uslovom da se ne nalazi blizu morske obale.

PRIMER 5.1 *Na barometru su očitane sledeće vrednosti:* $p = 941.23$ hPa *i* $T = 21.2°$C. *Korekcija indeksa je nula,* $C_x = 0$. *Barometar se nalazi na geografskoj širini* 40.00 *i na visini od 652* m. *Izračunajte stanični pritisak.*

rešenje:

$$C_t = -1.634 \times 10^{-4} p_1 t = -1.634 \times 10^{-4} \times 941.23 \times 21.2 = -3.26 \text{ hPa}$$

$$p_2 = 941.23 + 0 - 3.26 = 937.97 \text{ hPa}$$

$$\begin{aligned} g_\varphi =& 9.80616(1 - 2.6373 \times 10^{-3} \cos(2 \cdot 40) + 5.9 \times 10^{-6} \cos^2(2 \cdot 40)) \\ =& 9.80167 \text{ ms}^{-2} \end{aligned}$$

$$g_{\varphi h} = 9.80167 - 3.086 \times 10^{-6} \cdot 625 = 9.79966 \text{ ms}^{-2}$$

$$C_g = \frac{g_{\varphi h} - g_r}{g_r} p_2 = \frac{9.79966 - 9.80616}{9.80616} 937.97 = -0.62 \text{ hPa}$$

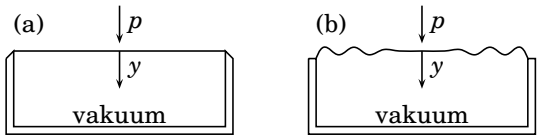
$$p_s = p_2 + C_g = 937.97 - 0.62 = 937.35 \text{ hPa}$$

Ukoliko bismo popravke računali prema jednačini (5.17), dobili bi vrednost $p_s = 937.346$ hPa.

5.1.2 Aneroidni barometri

Aneroidni barometri se sastoje od kutije iz koje je izvučen vazduh i elastične membrane koja se pomera pri promeni pritiska. Reč aneroid je grčkog porekla i znači bez vode (bez fluida). Povratna sila je elastična sila koja može da potiče iz same membrane. Postoje dva osnovna tipa aneroidnih barometara: sa senzorom u obliku zavarene ili zalemljene metalne membrane i senzorom u vidu integrisanog kola sa membranom od silicijuma.

Senzor sa metalnom membranom je kružna kapsula napravljena od metala koji ima odlične elastične karakteristike. Kalibraciona jednačina za jednostavnu



Slika 5.5: Poprečni presek jednostavne aneroidne komore sa ravnom (a) i naboranom (b) dijafragmom.

aneroidnu komoru sa ravnom metalnom membranom sa jedne strane je (Doebelin, 1983)

$$p = \frac{16Et^4}{3R^4(1-\nu^2)}\left[\frac{y}{t} + 0.488(\frac{y}{t})^3\right], \tag{5.20}$$

p je pritisak u Pa, E je modul elastičnosti (Nm^{-2}), y je pomeranje centralnog dela dijafragme (m), t je debljina dijafragme (m), R je poluprečnik dijafragme (m) i ν je Poasonov količnik koji je količnik bočnih i osnih napona i približno je $\frac{1}{3}$ za metale.

PRIMER 5.2 *Neka su poluprečnik i debljina metalne membrane* $R = 5\times10^{-2}$ m, $t = 8\times10^{-4}$ m *i moduo elastičnosti* $E = 1\times10^{11}$ Nm^{-2}. *Poasonov količnik je* $\frac{1}{3}$. *Izračunajte pritisak u slučajevima kada je količnik savijanja* $y_r = \frac{y}{t}$ *jednak 1.1, 1.2 i 1.3.*

rešenje: *Zamenom vrednosti u jednačinu (5.20) dobijamo vrednosti za pritisak* $p = 68794,\ 80344$ *i* 93276 Pa.

Kalibracionu jednačinu (5.20) možemo da napišemo u obliku

$$p = c_o\left[y_r + c_1 y_r^3\right]. \tag{5.21}$$

Ako je diferenciramo po pritisku i izrazimo $\frac{dy_r}{dp}$ dobićemo izraz za statičku osetljivost ravne membrane

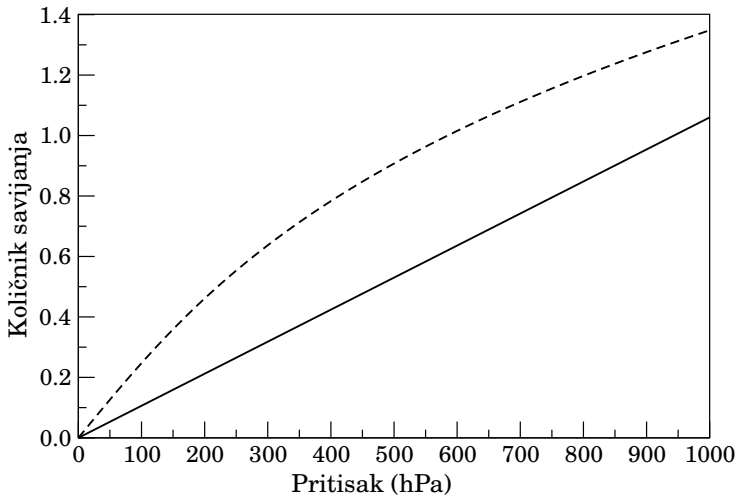
$$\frac{dy_r}{dp} = \frac{1}{c_o + 3c_o c_1 y_r^2}. \tag{5.22}$$

PRIMER 5.3 *Nastavljajući analizu prethodnog primera, statička osetljivost glatke membrane kada je* $y_r = 1.1,\ 1.2$ i 1.3 *je* $9.18\times10^{-4},\ 8.18\times10^{-4}$ *i* 7.32×10^{-4} hPa^{-1}.

Statička osetljivost opada sa porastom pritiska (sa porastom pomeranja membrane). Treba primetiti da su prikazana pomeranja membrane veoma mala, reda veličine debljine membrane, i da je odgovor nelinearan ($\frac{dy_r}{dp}$ u jednačini (5.22) nije konstantno). Nelinearnost se može smanjiti ako se koristi kruća membrana, ali se tada smanjuje i osetljivost.

U praksi je teško raditi sa malim pomeranjima membrane, pa se zbog toga koriste aneroidi sa naboranim membranama, kod kojih je povećana osetljivost i poboljšana linearnost. Normalizovana jednačina prenosa za ovakvu membranu je

$$y_r \equiv \frac{y}{t} = \frac{2.25\times10^5 D(1-\nu^2)}{tE}\left(1000\frac{t}{D}\right)^{-1.52} p, \tag{5.23}$$



Slika 5.6: Količnik savijanja $\frac{y}{t}$ u funkciji pritiska za ravnu dijafragmu (isprekidana linija) i za naboranu dijafragmu (puna linija).

$D = 2R$ i pritisak je izražen u Pa. Ova jednačina je nacrtana na slici 5.6. Korišćene su vrednosti iz primera 5.2. Statička osetljivost je 1.059×10^{-3} hPa^{-1}.

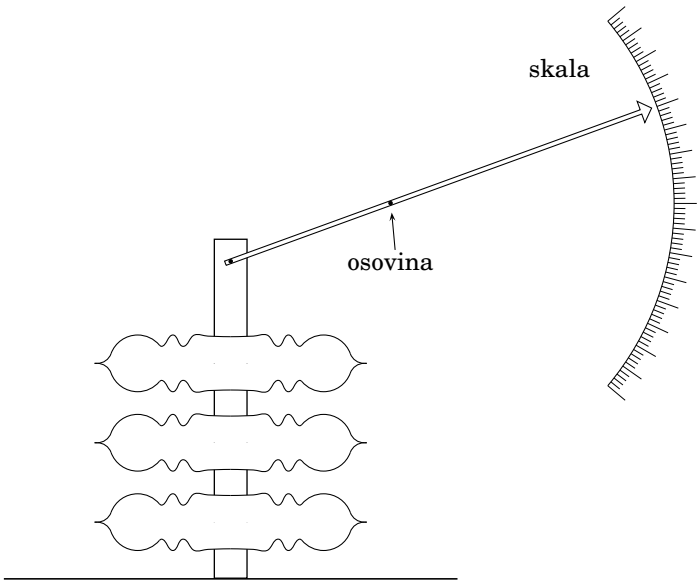
Tipična aneroidna kapsula se sastoji od dve spojene naborane membrane. Iz kapsula je najčešće izvučen vazduh, pritisak je do 1 Pa. U nekim kapsulama se nalazi inertan gas na oko 70 hPa zbog temperaturne kompenzacije. Kalibraciona jednačina treba da bude funkcija oblika membrane i količine gasa u kapsuli. Kako postoji mnoštvo različitih oblika membrana, često se koristi kalibraciona jednačina oblika

$$p_o = c_o + c_1 y + c_2 y^2 + T(c_3 + c_4 y + c_5 y^2) + T^2(c_6 + c_7 y + c_8 y^2), \tag{5.24}$$

y je sirovi izlaz senzora, T je temperatura senzora i c_i su konstante koje se određuju kalibracijom.

Kapsula može da pokreće brojčanu skalu, kao na slici 5.7, ili pero pisača, ili da dâ električni izlazni signal preko mehanički pokretanog promenljivog otpornika ili transformatora. U drugoj verziji, električni signal se generiše preko promenljivog kondenzatora, kao što je prikazano na slici 5.8. Kako se membrana savija, menja se rastojanje između obloga kondenzatora što izaziva promenu njegovog kapaciteta. Ako je takav kondenzator deo oscilatornog električnog kola, promena kapaciteta izaziva promenu frekvencije povezanu sa promenom atmosferskog pritiska. Na slici 5.4 prikazan je funkcionalni dijagram aneroida sa piezootpornim ili kapacitivnim pretvaračem. Piezootpornik menja otpor u zavisnosti od intenziteta sile koja deluje na njega. U tom slučaju otpornik je pričvršćen za (ili ugrađen u) membranu i sila koja deluje na njega je posledica pomeranja membrane.

U skorije vreme napravljen je senzor sa membranom od silicijuma koji koristi tehnologiju integrisanih kola. Kao i ostali aneroidi, senzor za pritisak sa integrisanim kolom može da bude apsolutni ili diferencijalni senzor. Apsolutni senzor za pritisak ima referentnu komoru sa vakuumom do oko 3×10^{-3} Pa. U jednoj verziji, u membranu je ugraviran otporni most i uz postojanje referentnog



Slika 5.7: Grupa aneroidnih ćelija povezanih sa brojčanim indikatorom.

napona, izlazni signal je napon iz mosta. U drugoj verziji, membrana i ploča na dnu su električni izolovane i formiraju kondenzator. Senzori sa integrisanim kolom su razvijeni za potrebe drugih senzora za pritisak i njihove ranije verzije nisu bile pogodne za barometriju. U međuvremenu je postignut značajan napredak u njihovoj konstrukciji i sada oni imaju preciznost koja je uporediva sa ostalim aneroidnim barometrima.

Senzori sa silicijumskom dijafragmom su slični uređajima sa metalnom dijafragmom i podložni su istim izvorima grešaka: temperaturna osetljivost, histerezis, nelinearnost i drift.

Glavni izvori grešaka aneroidnih barometara su:

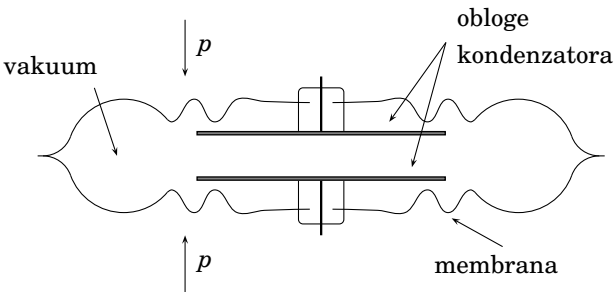
a) Aneroidni barometri su podložni istim greškama izlaganja kao živini barometri i moraju biti opremljeni nekom vrstom statičkog porta.

b) Svi barometri su osetljivi na greške prouzrokovane temperaturom. Temperaturna greška aneroidnih barometara je nelinearna, zavisi od stvarne vrednosti pritiska i ima različit funkcionalni oblik od senzora do senzora (čak i kod senzora istog proizvođača).

c) Pojedini aneroidni senzori imaju izražem histerezis. On nastaje kao posledica defekata i nepravilnosti u strukturi materijala i/ili oblika dijafragme.

d) Nelinearnost aneroidnih senzora se lako otklanja korišćenjem kalibracionog polinoma drugog ili trećeg stepena u ugrađenom mikroprocesoru. Ova vrsta greške je manje značajna od grešaka izazvanih promenom temperature, histerezisom i driftom.

e) Drift je dugotrajna promena osetljivosti senzora ili odstupanje zbog deformacije dijafragme.



Slika 5.8: Aneroidna kapsula sa kapacitivnim pretvaračem.

Jedna konfiguracija aneroidnog barometra može imati senzor sa integrisanim kolom koji konvertuje mala pomeranja dijafragme u napon, ugrađeni senzor za temperaturu, konvertor analognog u digitalni signal i mikroprocesor. Mikroprocesor kontroliše merni proces uzorkovanjem izlaznih signala iz aneroida i termometra. Mikroprocesor primenjuje kalibracionu jednačinu, vrši korekciju temperature i daje vrednost pritiska u pogodnim jedinicama.

Druga vrsta aneroidnog barometra, čiji senzor je Burdonova cev, prikazana je na slici 5.9. U unutrašnjosti cevi pritisak je atmosferski, a sama cev je smeštena u vakuumskoj komori. Poprečni presek cevi nije krug, već pravougaonik sa zaobljenim ivicama. Sa porastom pritiska poprečni presek Burdonove cevi se približava kružnom, a cev se ispravlja. Zbog toga se rastojanje y, koje je neobrađeni izlaz, povećava. Postoji više različitih pretvarača koji se koriste za merenje neobrađenog signala. U jednom slučaju, koristi se kvarcni element čija se rezonantna frekvencija menja u funkciji primenjene sile. U ovom slučaju, promena rastojanja ili sile kojom deluje Burdonova cev se konvertuje u frekvenciju.

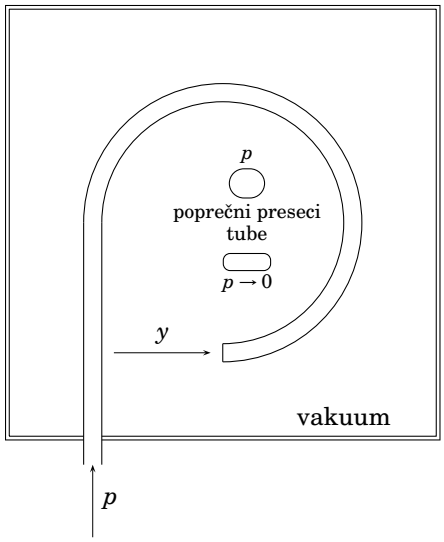
Barometar sa Burdonovom cevi može biti konstruisan i tako da je u Burdonovoj cevi vakuum, a da se ona nalazi u komori u kojoj je pritisak atmosferski.

5.2 Indirektno merenje pritiska

Merna tehnika za merenje pritiska je indirektna ako ona ne odgovara direktno na silu izazvanu atmosferskim pritiskom, već odgovara na neku drugu promenljivu koja je funkcija pritiska.

5.2.1 Tačka ključanja tečnosti

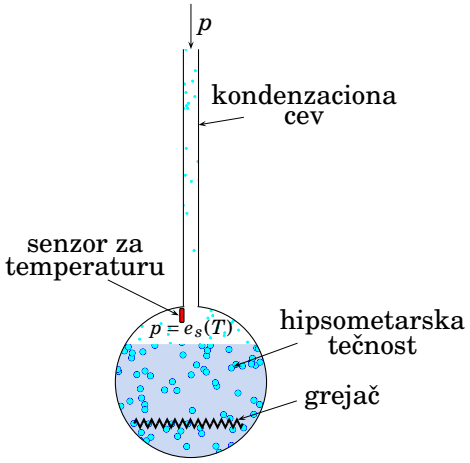
Temperatura ključanja tečnosti zavisi od same tečnosti i od atmosferskog pritiska. Kada tečnost ključa pritisak njene pare jednak je atmosferskom pritisku. Na primer, tačka ključanja čiste vode na standardnom pritisku, na nivou mora je $373,15K$ i opada sa smanjenjem pritiska. Senzor za pritisak koji koristi ovu osobinu zove se ***hipsometar***. Hipsometar čine boca sa hipsometarskim fluidom, grejač koji održava konstantnu temperaturu ključanja i senzor koji meri temperaturu ključanja. Šematski prikaz hipsometra prikazan je na slici 5.10. Ako je tačka ključanja fluida ispod okolne temperature grejač nije potreban. Zbog toga



Slika 5.9: Aneroidni barometar sa Burdonovom cevi.

je kao hipsometarska tečnost u radiosondama bio korišćen freon. Temperatura senzora koji se nalazi u radiosondi, koja se podiže uvis, je mnogo veća od temperature vazduha u okolini sonde, zbog vremena koje je potrebno da radiosonda izgubi toplotu. Moguće je koristiti vodu kao hipsometarski fluid, uz ugradnju grejača u radiosondi. Ponekad se koristi kondenzaciona cev za hvatanje fluida; para fluida se hladi i kondenzuje na hladnijim zidovima i vraća nazad u ključajuću komoru. Senzor za temperaturu se mora precizno postaviti da bi se dobilo reprezentativno merenje temperature ključanja. Veza između pritiska pare i temperature je Klauzijus-Klapejronova jednačina

$$\frac{d}{dT}\ln p = \frac{L}{RT^2}, \tag{5.25}$$



Slika 5.10: Šematski prikaz hipsometarskog barometra.

Tabela 5.1: Parametri za neke hipsometarske fluide. Temperatura ključanja je data na standardnom pritisku (1013.25 mb).

fluid/jedinice	Temperatura ključanja T_o (K)	Latentna toplota L (Jkg^{-1})	Gasna konstanta R ($JK^{-1}kg^{-1}$)
Voda	373.15	2.5×10^6	461.5
Freon-11	296.97	1.8×10^5	60.52
Freon-13	191.75	1.5×10^5	79.59
Ugljen-disulfid, CS_2	314.45	3.6×10^5	109.21
Ugljen-tetrahlorid, CCl_4	349.45	21×10^5	54.05

L je latentna toplota isparavanja, R gasna konstanta i T temperatura pare za koju se pretpostavlja da je ista kao temperatura fluida. U tabeli 5.1 su date vrednosti parametara nekih hipsometarskih fluida. Integracijom jednačine (5.25) dobija se kalibraciona jednačina

$$p = p_o \exp(\frac{L}{R}\frac{T - T_o}{TT_o}). \tag{5.26}$$

T_o je temperatura ključanja vode na pritisku p_o. Jednačina (5.26) nije potpuno tačna za vodu, s obzirom na to da je latentna toplota isparavanja vode funkcija temperature i da vodena para nije idealan gas. Međutim greška je mala u ovom kontekstu.

Kao što se može videti na slici 5.11, statička osetljivost hipsometra na nivou mora je veoma mala, tj. velika promena pritiska izaziva malu promenu temperature ključanja. Za upotrebu psihrometra na morskom nivou potrebni su izuzetno precizni senzori za temperaturu. Kako statička osetljivost senzora raste sa opadanjem pritiska, adekvatna primena hipsometra je u radio sondama, posebno zato što se tačnost merenja pomoću aneroida smanjuje na velikim visinama. Ranije su se kao radni fluid u radiosondažnim hipsometrima koristili freon, ugljen-disulfid ili ugljen-tetrahlorid. Ti hipsometri su bili dizajnirani da budu dopuna aneroidnom senzoru. Ovakva konfiguracija nije zahtevala veoma precizna merenja temperature, jer je hipsometar bio korišćen samo na malom pritisku, gde se njegova osetljivost povećava, a greške aneroida postaju prevelike. Neki savremeni senzori za temperaturu koji se koriste u hipsometrima imaju preciznost od 10 mK. Takvim hipsometrima je moguće meriti pritisak na svim visinama.

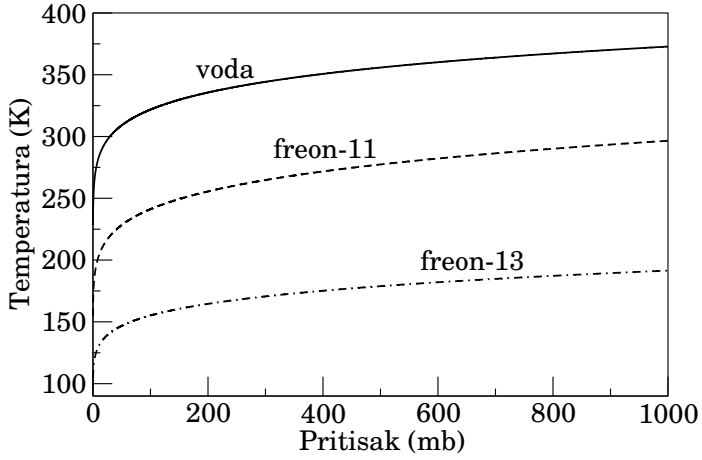
PRIMER 5.4 *Izračunajte grešku merenja pritiska hipsometrom sa vodom na morskom nivou, izazvanu greškom merenja temperature od 10* mK.

rešenje: *Diferenciranjem jednačine (5.26) dobijamo*

$$\frac{dp}{dT} = \frac{Lp_o}{RT^2}\exp(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T}).$$

Na nivou mora, $p = p_o$, $T = T_o$, *greška merenja pritiska je*

$$\Delta p = \frac{Lp_o}{RT_o^2}\Delta T = \frac{2.5 \times 10^6 \times 101325}{461.5 \times (373.15)^2}0.01 = 39 \text{ Pa}.$$



Slika 5.11: Temperature ključanja različitih hipsometarskih tečnosti u funkciji pritiska.

5.3 Poređenje različitih tipova barometara

5.3.1 Živini barometri

Živini barometri imaju sledeće karakteristike:

- Imaju jednostavan fizički koncept. Lako je vidljiv i razumljiv princip na kojem se zasniva njihov rad. Ne zahtevaju kalibraciju (podrazumeva se da imaju kalibrisanu skalu).
- Teško se automatizuju. Zahtevaju manuelno očitavanje.
- Nisu pogodni za transport.
- Moraju se držati u vertikalnom položaju.
- Zahtevaju popravku za temperaturu, zbog širenja žive i skale.
- Zahtevaju gravitacionu popravku, zbog toga što se barometarski pritisak uravnotežava težinom živinog stuba.
- Živina para je otrovna.
- Neodgovarajuće rukovanje može da ubaci mehuriće vazduha u vakuumsku cev i tako prouzrokuje greške.
- Prljanje žive može da smanji preciznost merenja.
- Postoji histerezis zbog trenja žive o staklo.
- Visina barometra se ne može smanjiti.

5.3.2 Aneroidni barometri

Ako se uzmu u obzir samo najbolji aneroidni barometri, bez obzira da li su sa velikom membranom, silicijumskom membranom ili Burdonovom cevi, oni imaju sledeće osobine:

- Nisu glomazni.

- Jednostavno se automatizuju.
- Neosetljivi su na orijentaciju, kretanje i udarce (u razumnim granicama) i zbog toga su lako prenosivi.
- Ne zahtevaju gravitacionu popravku.
- Korisnici nisu izloženi otrovnim materijama.
- Iako je osnovni koncept jednostavan, implementacija je kompleksna i neophodna je kalibracija.
- Temperaturna osetljivost je izrazita i ne postoji jednostavna korekcija, kao kod živinih barometara.
- Imaju nepredvidljiv drift. Zbog toga su neophodne česte kontrole i rekalibracije.

5.3.3 Hipsometar

Hipsometar je najspecijalizovaniji tip barometra i ima veoma ograničeno područje primene. Hipsometri se odlikuju sledećim karakteristikama:

- Nisu glomazni.
- Mogu se automatizovati.
- Mogu se lako transportovati, mada su osetljivi na orijentaciju.
- Ne zahtevaju temperaturnu niti gravitacionu korekciju.
- Fizički princip njihovog rada je jednostavan i nije potrebna kalibracija (podrazumeva se postojanje kalibrisanog senzora za temperaturu).
- Ne postoji drift ni histerezis.
- Zbog ekstremne nelinearnosti teško ih je koristiti na pritisku na nivou mora (potrebni su veoma precizni senzori za temperaturu).

5.4 Postupak očitavanja i primena korekcije kod Fortenovog barometra

Očitavanje Fortenovog barometra se vrši na sledeći način:

a) Po otvaranju kutije sa barometrom očitava se temperatura i to prvo deseti delovi °C.

b) Koristeći zavrtanj sa donje strane barometra podesi se nivo žive u cisterni tako da živa tačno dodiruje referentni konus.

c) Laganim kucanjem po cisterni se pokrene deo žive koja se zalepila za staklenu cev. Proveri se nivo i eventualno ponovi korak b.

d) Podesi se skala do vrha stuba žive. Linija obeležena nulom treba da tangira vrh meniska žive, kada je oko u nivou meniska.

e) Pomoću nonijusa se očita pritisak p_1 sa tačnošću 0.1 hPa.

f) Smanji se nivo žive u cisterni, tako da više ne dodiruje referentni konus, isključi se svetlo i zatvori kutija barometra.

Primena korekcije na čitanu vrednost Fortenovog barometra se sastoji u sledećem:

a) Indeksna korekcija C_x je zapisana u sertifikatu barometra. Dobijena je poređenjem sa standardnim barometrom.

b) Korekcija temperature C_t se računa na osnovu jednačine (5.10). Vrednost pritiska posle primene indeksne i korekcije temperature je $p_2 = p_1 + C_x + C_t$.

c) Gravitaciona korekcija se dobija po određivanju visine i nadmorske širine barometra primenom jednačine $C_g = \frac{g_{\varphi h} - g_r}{g_r} p_2$, a $g_{\varphi h}$ se računa prema jednačini (5.19). Stanični pritisak se računa kao $p_s = p_2 + C_g$.

Glava 6

Merenje vetra

Instrument za merenje jedne ili svih komponenti vetra zove se anemometar. Ponekad je anemometar integrisan sa vetrokazom ili vetruljom, kojim se meri pravac vetra. Pošto je vertikalna komponenta brzine vetra u blizini tla obično mala, uobičajeno je da se vetar predstavlja preko horizontalne komponente vektora vetra. Vektor vetra može da bude izražen preko svojih komponenata (u, v i ponekad w), koje su usmerene ka severu, istoku i vertikalno naviše. Vektor vetra se može predstaviti i preko brzine (intenziteta) i pravca. U slučaju horizontalnog vetra, pravac vetra je pravac iz koga vetar duva meren u stepenima u pravcu kazaljke na satu u odnosu na geografski sever. Trodimenzionalni vektor vetra se može izraziti preko brzine, horizontalnog pravca i ugla elevacije.

Standardne jedinice za brzinu vetra su ms^{-1} i čvor (knot). Čvor je nautička milja po satu, a nautička milja (1.852 km) je lučno rastojanje duž meridijana ugaone širine od jednog minuta. Jedan čvor je 0.5144444 ms^{-1}.

Vektor vetra je turbulentan, tj. menjaju mu se intenzitet, pravac i period. Vektor vetra se može definisati preko srednjeg toka i odstupanja (perturbacije) od srednjeg toka. Standard WMO definiše srednju vrednost kao vrednost koja je dobijena osrednjavanjem za vreme od 10 minuta.

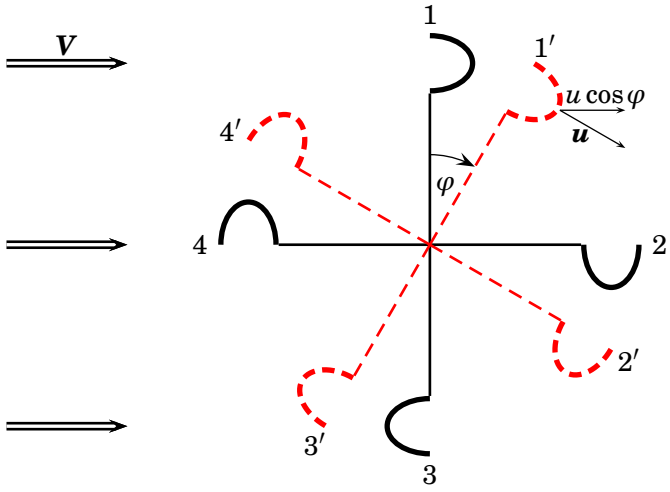
6.1 Metodi merenja

Idealni instrument za merenje karakteristika vetra bi trebao da reaguje na najslabiji povetarac i da bude dovoljno čvrst da podnese silu olujnog vetra, da može da reaguje na promenljive turbulentne fluktuacije, da daje linearan izlazni signal i da pokazuje jednostavne dinamičke karakteristike. Teško je napraviti senzor koji će da reaguje kada se brzina vetra približava nuli i koji će da ostane neoštećen kada brzina vetra postane veoma velika. Zbog toga je razvijen veliki broj različitih senzora koji mogu da zadovolje različite zahteve.

6.1.1 Sila pritiska vetra

Sila trenja vetra na neki objekat je

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \tag{6.1}$$



Slika 6.1: Šematski prikaz horizontalnog preseka anemometra sa čašicama u polju vetra. Punom linijom je prikazan anemometar u početnom trenutku u stanju mirovanja, a isprekidanom linijom u trenutku kada se okreće i kada čašice imaju periferijsku brzinu u.

C_d je bezdimenzioni koeficijent trenja, funkcija je oblika instrumenta i brzine vetra i ima vrednost $0 < C_d \leq 1$. Koeficijent trenja ne zavisi mnogo od brzine vetra i zbog toga se može smatrati da je njegova vrednost samo funkcija oblika instrumenta. Gustina vazduha ρ je u kgm^{-3}. A je površina poprečnog preseka senzora u m^2 i V je brzina vetra u ms^{-1}. Za neke senzore, brzina vetra mora da bude izražena u vektorskom obliku i kod njih se V^2 zamenjuje sa $\boldsymbol{V}|\boldsymbol{V}|$ (ili $\vec{V}|\vec{V}|$).

6.1.1.1 Anemometar sa čašicama

Anemometar sa čašicama rotira u vetru zbog toga što je sila trenja koja deluje na otvorenu stranu čašice veća od sile trenja koja deluje na suprotnu, ispupčenu stranu čašice. Na slici 6.1 prikazan je horizontalni presek anemometra sa četiri čašice, koji rotira oko vertikalne ose u polju vetra $\boldsymbol{V}$. Neka anemometar miruje u početnom trenutku vremena. Koeficijent trenja za čašicu br. 1 je veći od koeficijenta trenja za čašicu br. 3. Zbog toga je sila pritiska vetra koja deluje na čašicu br. 1 veća je od sile kojom vetar deluje na čašicu br. 3, i anemometar počinje da rotira u smeru kazaljke na satu. Intenzitet periferijske brzine čašica, u, zavisi od ugaone brzine anemometra, ω, i jednak je

$$u = \frac{R\,d\varphi}{d\tau} = R\omega, \tag{6.2}$$

a R je rastojanje centra čašice od ose rotacije. Brzina vetra u odnosu na čašicu zavisi od položaja čašice i jednaka je

$$v = V - u\cos\varphi. \tag{6.3}$$

Intenzitet sile pritiska vetra na čašicu br. 1 ($\varphi = 0,\ \cos\varphi = 1$) je

$$F_{d1} = \frac{1}{2} C_{d1} A_1 \rho (V-u)^2.$$

Na čašicu br. 3 ($\varphi = \pi,\ \cos\varphi = -1$) deluje sila pritiska vetra intenziteta

$$F_{d3} = \frac{1}{2} C_{d3} A_3 \rho (V+u)^2$$

i na čašice br. 2 i br. 4 ($\varphi = \pi/2$ i $\varphi = 3\pi/2,\ \cos\varphi = 0$)

$$F_{d2} = F_{d4} = \frac{1}{2} C_{d2} A_2 \rho V^2.$$

Jednačina kretanja anemometra sa n čašica može da se napiše u obliku

$$I\frac{d\boldsymbol{\omega}}{d\tau} = \boldsymbol{M}_{tr} + \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{R}_i \times \boldsymbol{F}_{di} = \boldsymbol{M}_{tr} + \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{R}_i \times \frac{1}{2} C_{di} A_i \rho (\boldsymbol{V} - u\cos\varphi_i \boldsymbol{i}), \tag{6.4}$$

I je moment inercije anemometra, $\boldsymbol{\omega}$ je vektor ugaone brzine, $\boldsymbol{M}_{tr}$ je moment sila trenja (mehaničko trenje u ležaju osovine i trenje čašica o vazduh) koje deluju na anemometar i $\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{R}_i \times \boldsymbol{F}_{di}$ je suma momenata sila pritiska vazduha na čašice. U jednačini (6.4) A_i i C_{di} su funkcije ugla φ, što je čini izuzetno komplikovanom. Posmatraćemo rešenja za dve idealizovane situacije koje imaju veliki praktični značaj.

U prvom slučaju vetar je konstantan ($\boldsymbol{V} = \overrightarrow{\text{const.}}$) i anemometar rotira bez ubrzanja konstantnom ugaonom brzinom ($\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = 0 \ \Rightarrow\ \omega = const.$). Takođe, pretpostavljeno je da je suma momenata sila pritiska vazduha na čašice konstantna i da je jednaka momentu u početnom položaju (za $\varphi = 0$)

$$\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{R}_i \times \boldsymbol{F}_{di} = \frac{1}{2} RA\rho \left[C_{d1}(V - R\omega)^2 - C_{d3}(V + R\omega)^2 \right] \tag{6.5}$$

i da je trenje zanemarljivo malo ($\boldsymbol{M}_{tr} = 0$). Jednačina kretanja (6.4) se tada svodi na jednačinu

$$0 = C_{d1}(V - R\omega)^2 - C_{d3}(V + R\omega)^2$$

ili na kvadratnu jednačinu po V

$$V^2 - 2R\omega \frac{C_{d1} + C_{d3}}{C_{d1} - C_{d3}} V + R^2\omega^2 = 0. \tag{6.6}$$

Rešenje jednačine (6.6) je

$$\frac{V_{1/2}}{R\omega} = \frac{V_{1/2}}{u} = \frac{C_{d1}/C_{d3} + 1}{C_{d1}/C_{d3} - 1} \left[1 \pm \sqrt{1 - \left(\frac{C_{d1}/C_{d3} - 1}{C_{d1}/C_{d3} + 1} \right)^2} \right]. \tag{6.7}$$

Veličina $\sigma = \frac{V}{u}$ se naziva koeficijent anemometra. Koeficijenti otpora C_{d1} i C_{d3} su funkcije oblika i veličine čašica. Eksperimentalno je pokazano da je količnik $\frac{C_{d1}}{C_{d3}}$ približno konstantan i da je njegova vrednost $\frac{C_{d1}}{C_{d3}} = 4$. Zamenom ove vrednosti u (6.7) dobijamo dva rešenja $\frac{V_1}{u} = 3$ i $\frac{V_2}{u} = \frac{1}{3}$. Drugo rešenje nije prirodno jer je kod njega periferijska brzina čašica tri puta veća od brzine vazduha.

U drugom idealizovanom slučaju srednja (za vreme jednog obrta) suma momenata sila pritiska vazduha na čašice proporcionalna je kvadratu brzine vazdušne struje i članu klizanja

$$\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{F}_{di} = kV^2 \frac{\tilde{\omega} - \omega}{\tilde{\omega}}. \tag{6.8}$$

Član klizanja $\frac{\tilde{\omega}-\omega}{\tilde{\omega}}$ je relativna razlika ugaone brzine pri ravnotežnoj rotaciji ($\tilde{\omega} = \frac{V}{R\sigma}$) i trenutne ugaone brzine rotacije sistema ω. Moment sila trenja je i u ovom slučaju zanemarljivo mali ($\boldsymbol{M}_{tr} = 0$), pa je jednačina kretanja

$$I \frac{d^2\varphi}{d\tau^2} = kV^2 \frac{\tilde{\omega} - \omega}{\tilde{\omega}} \tag{6.9}$$

ili

$$I \frac{d\omega}{d\tau} = kV^2 \frac{\frac{V}{R\sigma} - \omega}{\frac{V}{R\sigma}}. \tag{6.10}$$

Drukčije napisana jednačina kretanja (6.10) je

$$\frac{d\omega}{d\tau} + \frac{\sigma R k V}{I}\omega - \frac{kV^2}{I} = 0. \tag{6.11}$$

Ova jednačina je diferencijalna jednačina prvog reda. V i k su u opštem slučaju funkcije vremena pa je jednačina kretanja oblika

$$y'(x) + P(x)y = Q(x). \tag{6.12}$$

Rešenje jednačine (6.12) je

$$y = C_1 e^{-\int P(x)dx} + e^{-\int P(x)dx} \int Q(x) e^{\int P(x)dx} dx. \tag{6.13}$$

Prema tome, ugaona brzina rotacije anemometra će biti

$$\omega(\tau) = C_1 e^{-\int_0^\tau \frac{\sigma R k V}{I} d\tau} + e^{-\int_0^\tau \frac{\sigma R k V}{I} d\tau} \int_0^\tau \frac{kV^2}{I} e^{\int_0^\tau \frac{\sigma R k V}{I} d\tau} d\tau. \tag{6.14}$$

Uvešćemo dve nove promenljive, put sinhronizacije $L \equiv \frac{I}{\sigma R k}$ (konstanta koja karakteriše dati sistem čašica) i fiktivnu brzinu vetra $v_f \equiv \sigma R \omega$ (brzina vetra koju pokazuje anemometar). Jednačina (6.14) sa novim promenljivim je

$$\omega(\tau) = C_1 e^{-\int_0^\tau \frac{V}{L} d\tau} + e^{-\int_0^\tau \frac{V}{L} d\tau} \frac{k}{I} \int_0^\tau V^2 e^{\int_0^\tau \frac{V}{L} d\tau} d\tau. \tag{6.15}$$

U početnom trenutku (za $\tau = 0$), ugaona brzina anemometra je $\omega(0) = \omega_o$, pa iz (6.15) dobijamo vrednost konstante integracije

$$\omega_o = C_1 + \frac{k}{I} \int_0^0 \cdots \Rightarrow C_1 = \omega_o. \tag{6.16}$$

Ako je brzina vazduha koju pokazuje anemometar u početnom trenutku vremena $v_{fo} = \sigma R \omega_o$ možemo napisati

$$\frac{v_f(\tau)}{\sigma R} = \frac{v_{fo}}{\sigma R} e^{-\int_0^\tau \frac{V}{L} d\tau} + e^{-\int_0^\tau \frac{V}{L} d\tau} \frac{k}{I} \int_0^\tau V^2 e^{\int_0^\tau \frac{V}{L} d\tau} d\tau,$$

ili

$$v_f(\tau) = e^{-\frac{1}{L}\int_0^\tau V d\tau} (v_{fo} + \frac{1}{L} \int_0^\tau V^2 e^{\frac{1}{L}\int_0^\tau V d\tau} d\tau). \tag{6.17}$$

U specijalnom slučaju, kada je $V = const.$, iz (6.17) dobijamo

$$v_f(\tau) = e^{-\frac{V\tau}{L}} (v_{fo} + \frac{V^2}{L} \int_0^\tau e^{\frac{V\tau}{L}} d\tau) = e^{-\frac{V\tau}{L}} \left[v_{fo} + \frac{V^2}{L} \frac{L}{V} (e^{\frac{V}{L}\tau} - 1) \right],$$

ili

$$v_f(\tau) - V = (v_{fo} - V) e^{-\frac{V\tau}{L}}. \tag{6.18}$$

U slučaju bezinercijalnog anemometra ($L = 0$), iz jednačine (6.18) bi dobili $v_f(\tau) = V$, što znači da bi u ovom slučaju brzina koju pokazuje anemometar bila jednaka stvarnoj brzini vazduha za bilo koje vreme τ. Sličan rezultat bi dobili i za inercijalni anemometar ($L \neq 0$) ako je proteklo dovoljno vremena ($\tau \to \infty$).

Ako je $L = V\tau$, iz (6.18) bi dobili

$$v_f(\tau) - V = \frac{v_{fo} - V}{e},$$

što znači da je L put koji pređe vazduh da bi se početna razlika između brzine koju pokazuje anemometar i stvarne brzine vazduha smanjila za e. Vreme sinhronizacije se onda definiše kao vreme za koje vazduh pređe rastojanje jednako putu sinhronizacije $\tau = \frac{L}{V}$. Vreme sinhronizacije se drukčije naziva koeficijent inercije anemometra.

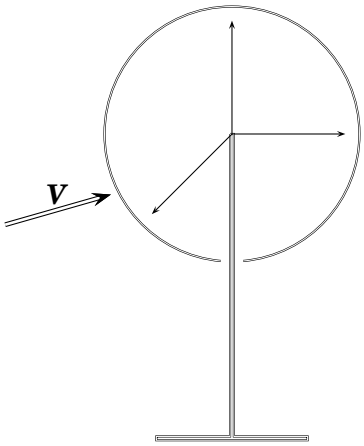
6.1.1.2 Anemometar u obliku cilindra ili sfere

Senzor ovog anemometra, prikazanog na slici 6.2, meri silu kojom vetar deluje na prijemni element u obliku cilindra ili sfere. Cilindar se koristi za merenje dvodimenzionog vetra, a sfera za merenje trodimenzionog vektora vetra. Za razliku od čašica ili propelera koji rotiraju u vetru i pri tome su izloženi sili otpora vazduha, sfera ne rotira i njeno kretanje zbog vetra je veoma ograničeno. Sila kojom vetar deluje na sferu je

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{2} \rho A C_d \boldsymbol{V} |\boldsymbol{V}| \tag{6.19}$$

$\boldsymbol{F}$ je sila trenja i $\boldsymbol{V}$ je vektor brzine vetra. Vektor brzine vetra možemo da napišemo kao

$$\boldsymbol{V} = u\boldsymbol{i} + v\boldsymbol{j} + w\boldsymbol{k}, \tag{6.20}$$



Slika 6.2: Anemometar u obliku sfere.

a njegov intenzitet

$$|\boldsymbol{V}| = \sqrt{u^2+v^2+w^2}, \tag{6.21}$$

pa je sila koja deluje na sferu

$$\boldsymbol{F} = K\sqrt{u^2+v^2+w^2}\,(u\boldsymbol{i}+v\boldsymbol{j}+w\boldsymbol{k}) \tag{6.22}$$

i $K = \frac{1}{2}\rho A C_d$. Svaka komponenta brzine će biti funkcija sve tri komponente sile. Komponente sile $\boldsymbol{F}$ (F_u, F_v *i* F_w) možemo da dobijemo ako vektor sile skalarno pomnožimo ortovima $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}$ *i* $\boldsymbol{k}$

$$\left.\begin{aligned} F_u &= K\sqrt{u^2+v^2+w^2}\,u \\ F_v &= K\sqrt{u^2+v^2+w^2}\,v \\ F_w &= K\sqrt{u^2+v^2+w^2}\,w \end{aligned}\right\} \quad \Rightarrow: \quad \left.\begin{aligned} F_u^2 &= K^2(u^2+v^2+w^2)\,u^2 \\ F_v^2 &= K^2(u^2+v^2+w^2)\,v^2 \\ F_w^2 &= K^2(u^2+v^2+w^2)\,w^2, \end{aligned}\right\} + \quad \Rightarrow: \tag{6.23}$$

$$F_u^2 + F_v^2 + F_w^2 = K^2(u^2+v^2+w^2)^2. \tag{6.24}$$

Iz jednačine (6.24) dobijamo

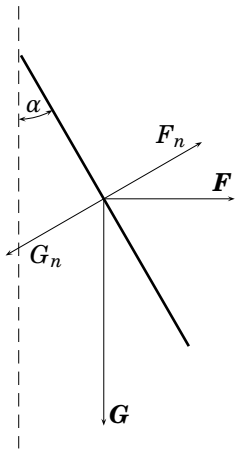
$$u^2+v^2+w^2 = K^{-1}\sqrt{F_u^2+F_v^2+F_w^2}, \tag{6.25}$$

odnosno

$$(u^2+v^2+w^2)^{-\frac{1}{2}} = K^{\frac{1}{2}}(F_u^2+F_v^2+F_w^2)^{-\frac{1}{4}}. \tag{6.26}$$

Iz jednačine (6.23) možemo izraziti komponente brzine

$$\begin{aligned} u &= F_u K^{-1}(u^2+v^2+w^2)^{-\frac{1}{2}} \\ v &= F_v K^{-1}(u^2+v^2+w^2)^{-\frac{1}{2}} \\ w &= F_w K^{-1}(u^2+v^2+w^2)^{-\frac{1}{2}}, \end{aligned} \tag{6.27}$$



Slika 6.3: Ravnoteža sila za anemometar u obliku pločice.

i uz jednačinu (6.26)

$$\begin{aligned} u &= F_u K^{-\frac{1}{2}} (F_u + F_v + F_w)^{-\frac{1}{4}} \\ v &= F_v K^{-\frac{1}{2}} (F_u + F_v + F_w)^{-\frac{1}{4}} \\ w &= F_w K^{-\frac{1}{2}} (F_u + F_v + F_w)^{-\frac{1}{4}}. \end{aligned} \tag{6.28}$$

Na ovaj način, ako su izmerene sve tri komponente sile trenja, mogu se izračunati komponente brzine vetra. Ovi proračuni se mogu jednostavno izvršiti upotrebom mikroprocesora ugrađenog u instrument.

6.1.1.3 Anemometar u obliku pločice

Senzor ovog anemometra, prikazanog na slici 6.3, je metalna pločica koja može da rotira oko horizontalne ose koja se nalazi u istoj ravni sa pločicom i iznad centra mase pločice. Pločica i skala su vertikalnom šipkom fiksirane za vetrulju, koja ih uvek postavlja normalno na horizontalni vetar. Ako je vetar konstantan pločica će mirovati i biti otklonjena od vertikalne ravni za ugao α. Tada su u ravnoteži normalna komponenta sile trenja vetra koja deluje na pločicu, F_n, i normalna komponenta težine pločice, G_n. Sila trenja vetra koja deluje na pločicu je

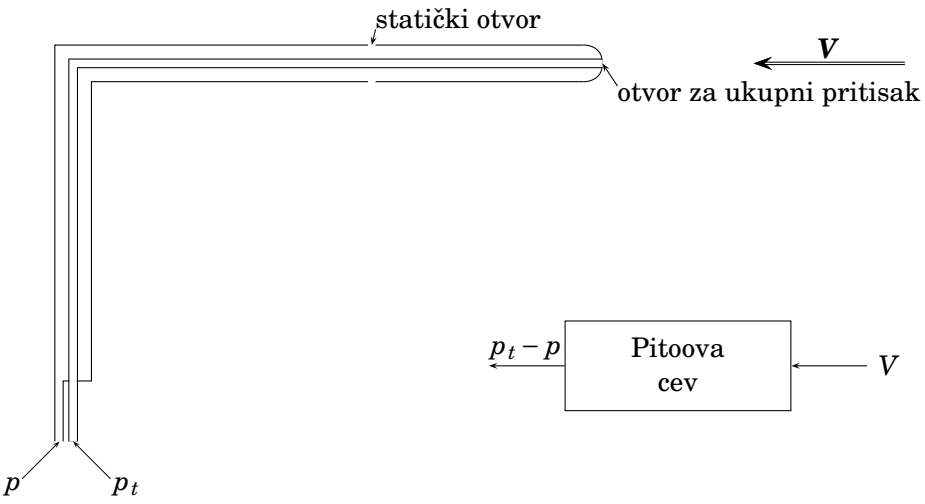
$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{2}\rho C_d S(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{V})\boldsymbol{V} = \frac{1}{2}\rho C_d S V\cos\alpha\boldsymbol{V}, \tag{6.29}$$

S je površina pločice i $\boldsymbol{n}$ je jedinični vektor normalan na pločicu. Normalna komponenta ove sile je

$$F_n = \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{n} = \frac{1}{2}\rho C_d S V\cos\alpha\boldsymbol{V}\cdot\boldsymbol{n} = \frac{1}{2}\rho C_d S V^2\cos^2\alpha. \tag{6.30}$$

Normalna komponenta težine pločice je

$$G_n = \boldsymbol{G}\cdot\boldsymbol{n} = G\cos(\frac{\pi}{2}-\alpha) = G\sin\alpha. \tag{6.31}$$



Slika 6.4: Šematski prikaz Pitoove cevi i blok-dijagram za nju. Ulazni signal je brzina vetra, a izlazni je razlika ukupnog i statičkog pritiska $p_t - p$.

Ako je vetar konstantan, pločica će mirovati i biće otklonjena od vertikalne ravni za ugao α. Tada su komponente F_n i G_n jednake

$$\frac{1}{2}\rho C_d S V^2 \cos^2\alpha = G\sin\alpha. \tag{6.32}$$

Odavde dobijamo izraz za brzinu vetra u obliku

$$V = \sqrt{\frac{2G\sin\alpha}{\rho S C_d \cos^2\alpha}}. \tag{6.33}$$

6.1.1.4 Pitoova cev

Pitoova cev je instrument sastavljen od dve koncentrične cevi, kao što je prikazano na slici 6.4. Jedna cev je orijentisana u pravcu iz kog duva vetar i ima otvor na koji deluje ukupan pritisak (statički i dinamički)

$$p_t = p + \frac{1}{2}\rho V^2. \tag{6.34}$$

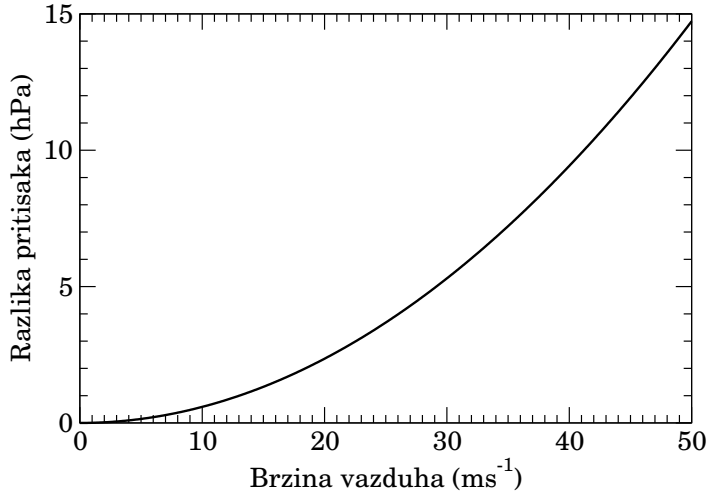
Otvor druge cevi je paralelan strujanju i na njega deluje samo statički pritisak vazduha p. Jednačina transfera Pitoove cevi,

$$\Delta p = p_t - p = \frac{1}{2}\rho V^2, \tag{6.35}$$

prikazana je na slici 6.5.

Statička osetljivost, $S = \frac{d\Delta p}{dV} = \rho V$, raste sa porastom brzine. Kalibraciona jednačina je

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \sqrt{2RT\frac{\Delta p}{p}}, \tag{6.36}$$



Slika 6.5: Izlazni signal Pitoove cevi Δp (hPa) u funkciji brzine vazduha V (ms^{-1}), pri $p = 1000$ hPa, $T = 20$ °C, $U = 75\%$.

T je temperatura i R je gasna konstanta vlažnog vazduha. Kako gasna konstanta zavisi od vlažnosti vazduha, izračunata brzina vetra će biti funkcija vlažnosti. Ovaj uticaj je manji od 1%. Stišljivost vazduha ima uticaj na izračunatu brzinu, ali samo za brzine veće od 100 ms^{-1}. Uticaj stišljivosti je oko 1%.

Anemometar u obliku Pitoove cevi je idealan instrument za merenje brzine vazduha u aerotunelima (*eng. wind tunnel*), i zbog toga se često koristi za kalibraciju drugih anemometara. Jeftin je, ne zahteva kalibraciju, ali mora da koristi veoma precizan senzor za merenje razlike pritisaka. Senzor za pritisak može da bude podložan promeni karakteristika u toku vremena (drift) i da bude zavisan od temperature.

6.1.2 Termoanemometri

Jedan od najjednostavnijih termoanemometara je ***katatermometar***. Katatermometar je sličan običnom termometru, a razlikuje se po tome što ima dva proširenja na kapilari, donje proširenje je rezervoar, a gornje je rezervoar za izlivanje viška termometarske tečnosti. Merni opseg ovog termometra je prilično uzak, od 35°C do 38°C. Brzina vazduha se meri katatermometrom na osnovu njegove brzine hlađenja, $H = F/t$, F je gubitak toplote po jedinici površine rezervoara termometra i t je vreme za koje se temperatura termometra smanji od 38°C do 35°C. Merenje brzine vetra katatermometrom se vrši tako što se on zagreje iznad 38°C, pri čemu se deo termometarske tečnosti izlije u gornji rezervoar i zatim se izloži vetru i ostavi da se hladi. Meri se vreme potrebno da se temperatura smanji od 38°C do 35°C. Brzina vetra se izračunava poluempirijskom relacijom, $v = f(H)$, datom u specifikaciji termometra. Jedna takva relacija je

$$B^2V = \left[\frac{F}{(36.5 - T)t - A}\right]^2, \tag{6.37}$$

T je temperatura vazduha u °C, A i B su eksperimentalne konstante koje se po malo razlikuju za svaki instrument i V je brzina vetra. Pomoću katatermometra se, za razliku od anemometra sa čašicama, mogu meriti vrlo male brzine vetra.

6.1.2.1 Anemometri sa vrućom žicom ili filmom

Toplotni anemometri se koriste za merenje fluktuacija brzine vazduha. Odlikuju se dobrom prostornom i vremenskom rezolucijom. Metod merenja se zasniva na prenosu toplote od malog zagrejanog senzora postavljenog u vazdušnoj struji. Senzori su napravljeni od materijala čiji električni otpor zavisi od temperature. Obično su u obliku tanke žice ili tankog filma.

Toplota se oslobađa u senzoru Džulovim zagrevanjem, a gubi se u najvećoj meri konvekcijom. Brzina zagrevanja je $R_w I_w^2$, I_w je jačina struje u senzoru i R_w je otpor zagrejanog senzora. Brzina hlađenja ima oblik $(T_w - T_a)\phi_{conv}(U,...)$, T_w je temperatura zagrejanog senzora, T_a je temperatura vazduha, ϕ_{conv} je funkcija koja zavisi uglavnom od normalne komponente brzine vazduha u odnosu na senzor. Mala količina toplote oslobođene u senzoru se odvodi provođenjem ka nosačima koji drže senzor, pa zbog toga postoji promena temperature duž senzora. Veličine T_w i R_w su u stvari srednje vrednosti duž senzora.

Za stacionarni tok vazduha oko anemometra, ravnoteža između zagrevanja i hlađenja ima oblik

$$R_w I_w^2 = (T_w - T_a)\phi_{conv}(U). \tag{6.38}$$

Brzina vetra U se može izračunati iz električnih veličina R_w i I_w, u slučaju kada se temperatura T_w može izraziti u funkciji otpora R_w, kao i T_a u funkciji R_a, gde je R_a otpor nezagrejanog senzora, tj. senzora na ambijentalnoj temperaturi T_a. Takve relacije postoje za većinu senzora. Obično se pretpostavlja da se otpori sa dovoljnom tačnošću mogu predstaviti linearnim funkcijama temperature

$$\begin{aligned} R_w &= R_o[1 + \alpha(T_w - T_o)], \\ R_a &= R_o[1 + \alpha(T_a - T_o)], \end{aligned} \tag{6.39}$$

T_o je referentna temperatura, R_o je otpor senzora na toj temperaturi i α je temperaturni koeficijent otpora materijala od koga je senzor napravljen.

Ukoliko je strujanje vazduha nestacionarno, što je slučaj u turbulentnom toku, toplotna energija senzora se menja i trenutni balans toplote se može opisati jednačinom

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = R_w I_w^2 - (T_w - T_a)\phi_{conv}(U), \tag{6.40}$$

m_w je masa senzora i c_w specifična toplota materijala senzora.

Kada je senzor element odgovarajućeg električnog sistema, promena otpora se može koristiti za generisanje merljivog signala. Postoje tri načina rada anemometra:

- Anemometar konstantne struje. Kod njega se jačina struje u senzoru održava na istoj vrednosti i promena napona dovodi do promene otpora R_w. Izlazni signal je promena otpora.

- Anemometar konstantne temperature. Otpor senzora se održava na konstantnoj vrednosti. Pri tome pri promeni napona dolazi do promene jačine struje kroz senzor. Izlazni signal je promena jačine struje.
- Anemometar konstantnog napona. Napon na senzoru se održava konstantnim ($V_w = I_w R_w = \text{const.}$). Izlazni signal je promenljiva jačina struje kroz senzor potrebna za održavanje konstantnog napona.

Koristeći dimenzionalnu analizu, jednačina balansa (6.38) može da se napiše u obliku

$$\text{Nu} = \text{Nu}\,(M,\ \text{Re},\ \text{Gr},\ \text{Pr},\ \gamma,\ \frac{T_w - T_a}{T_a}), \tag{6.41}$$

Nu, M, Re, Gr i Pr su, redom, Nusseltov, Mahov (Mach), Rejnoldsov (Reynolds), Grashofov i Prandtlov broj, koji zavise od debljine žice i osobina fluida koji je optiče, $\gamma = C_p/C_v$ je količnik toplotnih kapaciteta fluida pri konstantnom pritisku i konstantnoj zapremini. Ovi brojevi se, prema Tropea i dr. (2007), mogu napisati kao

$$\begin{aligned} &M = \frac{U}{c}, \quad \text{Nu} = \frac{R_w I_w^2}{\pi l k (T_w - T_a)}, \quad \text{Re} = \frac{\rho U d}{\mu}, \\ &\text{Gr} = g\beta(T_w - T_a) d^3 \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^2 \quad \text{i} \quad \text{Pr} = \mu \frac{C_p}{k}, \end{aligned} \tag{6.42}$$

c je brzina zvuka u fluidu, k, ρ i μ su, redom, toplotna provodljivost, gustina i dinamička viskoznost fluida i β je koeficijent termalnog širenja fluida pri konstantnom pritisku.

Za brzine vazduha u atmosferi, Mahov broj nema uticaj na prenos toplote, Prandtlov broj ima skoro konstantnu vrednost u širokom temperaturnom opsegu, $\text{Pr} \approx 0.70$, pa se jednačina (6.41) može pojednostaviti kao

$$\text{Nu} = \text{Nu}\,(\text{Re},\ \frac{T_w - T_a}{T_a}). \tag{6.43}$$

Za „vrlo dugu žicu“, kada je količnik dužine i prečnika žice, l/d, u opsegu od 2000 do 8000, jednačina za prenos toplote pri forsiranoj konvekciji se može napisati kao

$$\text{Nu} = (A_N + B_N \text{Re}^n) \left(\frac{T_w - T_a}{T_a}\right)^m, \tag{6.44}$$

A_N, B_N, n i m su konstante. Jedan od najčešće korišćenih izraza ovog oblika je Kramerova formula (Tropea i dr., 2007)

$$\text{Nu} = 0.39 + 0.51\sqrt{\text{Re}}, \tag{6.45}$$

koja može da se primeni za Rejnoldsove brojeve iz intervala $2.5 \leq \text{Re} \leq 1475$. Zamenom brojeva Re i Nu u Kramerovu formulu, koristeći jednačinu (6.39), dobijamo

$$\frac{R_w I_w^2}{R_w - R_a} = A + B\sqrt{U}, \tag{6.46}$$

gde su

$$A = 0.39\frac{\pi l k}{\alpha R_o} \quad \text{i} \quad B = 0.51\frac{\pi l k}{\alpha R_o}\sqrt{\frac{\rho d}{\mu}}.$$

Jednačina (6.46) je poznata kao Kingov zakon. Veličine A i B su funkcije prečnika žice i temperature vazduha. Zavisnost fizičkih osobina vazduha od temperature, u okolini $T_a = 293$ K, može da se izrazi stepenim funkcijama

$$\begin{aligned}
\frac{\rho(T)}{\rho(T_o)} &= \left(\frac{T}{T_o}\right)^{-1}, \\
\frac{\mu(T)}{\mu(T_o)} &= \left(\frac{T}{T_o}\right)^{m}, \\
\frac{k(T)}{k(T_o)} &= \left(\frac{T}{T_o}\right)^{n},
\end{aligned} \tag{6.47}$$

sa pogodnim vrednostima stepena $m \approx 0.765$ i $n \approx 0.885$. Koristeći (6.47), logaritamskim diferenciranjem, dobijamo zavisnost veličina A i B od temperature

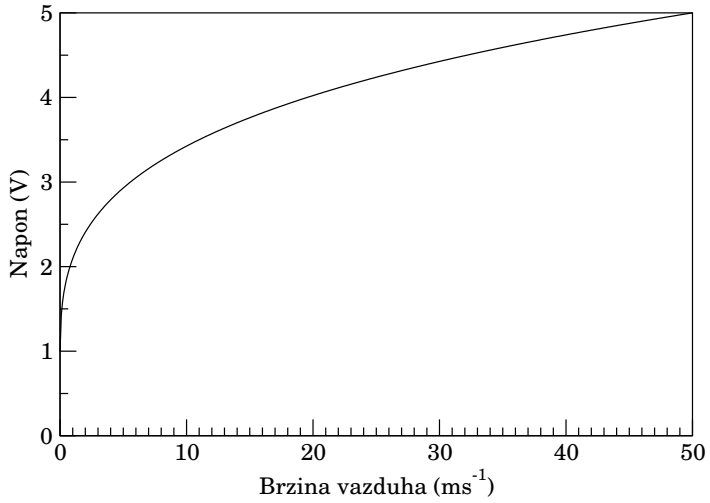
$$\begin{aligned}
\frac{dA}{A} &= 0.866\frac{dT_a}{T_a}, \\
\frac{dB}{B} &= (0.866 - 0.50 - 0.38)\frac{dT_a}{T_a} = 0.006\frac{dT_a}{T_a}.
\end{aligned} \tag{6.48}$$

Koeficijent B se sa promenom temperature menja znatno manje od koeficijenta A.

Senzori u obliku žice obično imaju prečnik od 0.5 do 5 μm, a dužina im je od 0.5 do 2 mm. Senzori u obliku filma imaju debljinu oko 0.1 μm i deponovani su na tankim cilindrima od kvarca prečnika od 25 do 50 μm, ili na kvarcnim šiljcima ili na tankim acetatnim ili kaptonskim[¶¶] folijama. Senzori su zaštićeni vrlo tankim kvarcnim premazom, koji ih štiti od korozije, habanja, mehaničkih oštećenja i električno ih izoluje (posebno važno u slučaju kada se merenja vrše u provodnoj sredini). Senzor je na krajevima spojen sa finim, ali dovoljno čvrstim nosačem, koji služi kao provodnik struje i mehanička potpora. Nosač senzora čine dve paralelne igle dugačke obično od 5 do 20 mm, konusnog oblika, tako da im je debljina u blizini senzora oko 100 μm. Često senzor ne zauzima svo rastojanje između igala. Deo koji spaja kraj senzora sa vrhom noseće igle napravljen je od materijala koji odlično provodi električnu struju, to je tzv. neaktivni deo senzora koji ne utiče na odgovor senzora na promenu ulaznog signala. Kod svih senzora je važno da imaju veliku vrednost količnika l/d. Ako je ovaj količnik veći od 300, žica će se hladiti komponentom brzine normalnom na nju, sa zanemarljivim transportom ka nosačima.

Materijali od kojih se prave senzori bi trebalo da imaju veliki temperaturni koeficijent otpora (kako bi imali veliku osetljivost na promenu brzine vazduha), odgovarajuću vrednost otpornosti koja omogućava njihovo zagrevanje pogodnim nivoima jačine struje i napona, dovoljno veliku otpornost na istezanje kako bi

[¶¶] Kapton je poliamidni film koji je stabilan u širokom opsegu temperatura, od -273 do $400°$C. Koristi se za izradu fleksibilnih štampanih kola i spoljnjeg sloja svemirskih odela.



Slika 6.6: Izlazni signal anemometra sa vrućom žicom (u obliku napona) u funkciji brzine vazduha. Korišćen je platinski senzor prečnika $d = 5$ μm i temperature $T_w = 500$ K. Slika je dobijena na osnovu jednačine (6.49), pri sledećim vrednostima: $T_a = 295$ K, $k = 0.0257$ Wm^{-1}K^{-1}, $\rho_e = 1.1 \times 10^{-7}$ Ωm, $\alpha = 3.9 \times 10^{-3}$ K^{-1}, $\mu = 1.82 \times 10^{-5}$ kgm^{-1}s^{-1} i $\rho = 1.25$ kgm^{-3}.

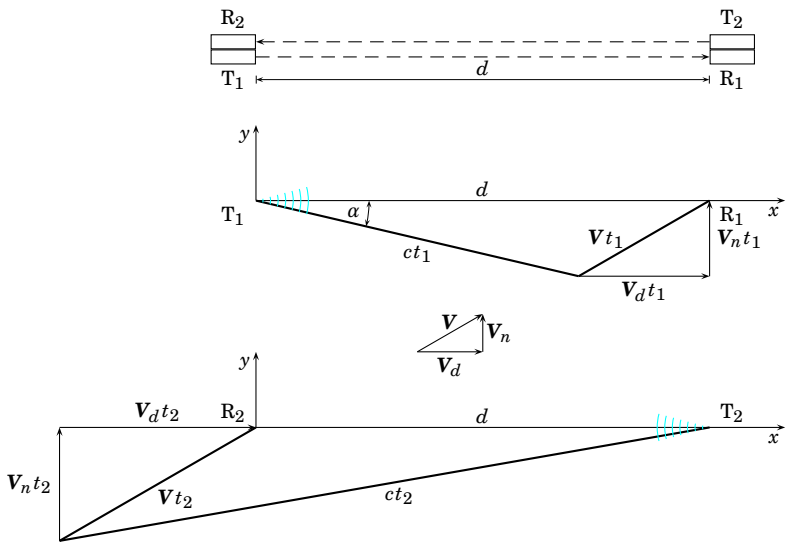
mogli da podnesu visoko opterećenje pri velikim brzinama vazduha i da mogu da se dobiju u obliku vrlo tanke žice. Najčešće korišćeni materijali za izradu senzora su volfram, platina, legure platine i iridijuma i platine i rodijuma.

Postoje različite konfiguracije instrumenata koje kombinuju dva, tri ili više senzora u obliku žica ili filma. Sa trostrukim senzorom se može dobiti informacija o trenutnoj vrednosti sve tri komponente vektora brzine vetra. Sa više senzora, od 4 do 12, se mogu meriti jedna ili više komponenata vektora vrtložnosti.

Senzori u obliku žice ili filma su podložni atmosferskoj kontaminaciji koja im može promeniti kalibrisane karakteristike. Veći senzori u obliku filma su manje osetljivi na prljanje i lakše se mogu očistiti kako bi povratili deklarisane karakteristike. Kišne kapi izazivaju pojavu pikova u podacima, što posle osrednjavanja povećava brzinu vetra. Anemometri sa vrućom žicom ili filmom su skupi i troše dosta struje. Moraju da se kalibrišu i podložni su driftu. Pomoću njih je teško meriti male brzine vetra, zbog toga što im statička osetljivost postaje vrlo velika kako se brzina vetra približava nuli, što je prikazano na slici 6.6. Iako je poželjno da senzor ima veliku statičku osetljivost, ona treba da bude približno uniformno raspoređena u celom mernom opsegu.

PRIMER 6.1 *Pokazati da relacija između jačine stuje, I_w, kroz senzor u obliku vruće žice temperature T_w, napravljen od materijala električne otpornosti ρ_e, i komponente brzine vazduha normalne na senzor može da se napiše u obliku*

$$I_w = \sqrt{\frac{T_w - T_a}{1 + \alpha(T_w - T_o)} \frac{\pi^2 d^2 k}{4\rho_e} \left(0.39 + 0.51 \sqrt{\frac{\rho d}{\mu}} \sqrt{U}\right)}. \tag{6.49}$$



Slika 6.7: Šematski prikaz principa rada jednoosnog zvučnog anemometra.

rešenje: *Zamenom*

$$\frac{R_w - R_a}{R_w} = \frac{\alpha(T_w - T_a)}{1 + \alpha(T_w - T_o)}$$

iz jednačine (6.39) u jednačinu (6.46) dobijamo

$$I_w^2 = \frac{\alpha(T_w - T_a)}{1 + \alpha(T_w - T_a)} \frac{\pi l k}{\alpha R_o}(0.39 + 0.51\sqrt{U}). \tag{6.50}$$

Ako električni otpor u funkciji otpornosti, dužine i površine poprečnog preseka žice, napisan u obliku

$$R_o = \rho_e \frac{l}{\pi(\frac{d}{2})^2} = \rho_e \frac{4l}{\pi d^2},$$

zamenimo u (6.50) dobićemo traženu relaciju.

6.1.3 Zvučni anemometar

Zvučni anemometar meri vreme koje je potrebno za prenošenje zvučnog signala duž fiksne putanje. Na osnovu vremena određuje se komponenta vektora vetra duž putanje. Šematski prikaz jednoosnog akustičnog anemometra dat je na slici 6.7. Vektor vetra je obeležen sa $\boldsymbol{V}$, komponenta vetra paralelna putanji zvuka je V_d, a komponenta normalna na putanju je V_n. Impulsi zvučne energije se periodično emituju sa predajnika T_1 i T_2 u pravcu prijemnika R_1 i R_2. Ako nema vetra, $V = 0$, zvučni signal će preći rastojanje od T_1 do R_1 (i od T_2 do R_2) za vreme $t = d/c$, gde je d rastojanje između predajnika i prijemnika, $c = \sqrt{\kappa R T}$ je brzina zvuka, $\kappa = c_p/c_v = 1.4$ je količnik specifičnih toplota, R je gasna konstanta i T temperatura vazduha.

PRIMER 6.2 *Rastojanje između predajnika i prijemnika zvučnog anemometra je* 20 cm. *Ako je temperatura vazduha* $T = 20°\text{C}$*, brzina zvuka će biti*

$$c = (1.4 \cdot 287 \cdot 293.15)^{\frac{1}{2}} = 343.2 \text{ ms}^{-1},$$

a vreme potrebno da zvuk pređe put od predajnika do prijemnika

$$t = \frac{d}{c} = \frac{0.2}{343.2} = 582.7 \ \mu\text{s}.$$

Vlažnost vazduha utiče na brzinu zvuka c, jer se sa promenom vlažnosti menja vrednost gasne konstante vlažnog vazduha. Tada se koristi $R_d T_v$, gde je T_v virtuelna temperatura. Na pritisku $p = 1000$ mb i temperaturi $T = 20°\text{C}$, pri promeni relativne vlažnosti od 0 do 100%, brzina zvuka se menja za 0.4%.

Kada je paralelna komponenta vetra različita od nule, $V_d \neq 0$, vreme putovanja zvuka će se promeniti, jer se tada zvučni talasi prenose duž vazdušne struje. Kada je ova komponenta vetra usmerena od T_1 do R_1, brzina zvučnog talasa će biti $c + V_d$, pa će vreme putovanja zvuka biti smanjeno. Vreme putovanja zvuka od T_2 do R_2 će se povećati, s obzirom da se rezultujuća brzina zvuka smanji na $c - V_d$.

Normalne komponente vetra imaju mnogo manji uticaj na vreme putovanja zvuka. One povećavaju odgovarajuće rastojanje na $d/\cos\alpha$ (smanjuju brzinu na $c\cos\alpha$), gde je $\alpha = \arcsin(V_n/c)$. Za $V_n = 20 \text{ ms}^{-1}$ i $c = 343.2 \text{ ms}^{-1}$, $\alpha = 0.058$ rad $= 3.3°$ i $\cos\alpha = 0.9983$, tako da se zbog normalne komponente vetra brzina zvuka smanjuje za 0.17%.

Vremena putovanja zvuka t_1 (od T_1 do R_1) i t_2 (od T_2 do R_2) su

$$t_1 = \frac{d}{c\cos\alpha + V_d}; \quad t_2 = \frac{d}{c\cos\alpha - V_d}. \tag{6.51}$$

Zbir inverznih vremena putovanja je

$$\begin{aligned} \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} &= \frac{c\cos\alpha + V_d}{d} + \frac{c\cos\alpha - V_d}{d} \\ &= \frac{2\cos\alpha}{d}\sqrt{\kappa R T} \approx \frac{2}{d}\sqrt{\kappa R T} \quad \text{ako je} \quad \cos\alpha \approx 1. \end{aligned} \tag{6.52}$$

Pretpostavka $\cos\alpha \approx 1$ je prihvatljiva osim u slučaju ekstremno jakog vetra.

Kvadriranjem jednačine (6.52) dobijamo

$$(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2})^2 = \frac{4}{d^2}\kappa R_d T_v$$

i odavde izraz za zvučnu virtuelnu temperaturu

$$T_v = \frac{1}{\kappa R_d}\left[\frac{d}{2}(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2})\right]^2. \tag{6.53}$$

Oduzimanjem recipročnih vrednosti vremena putovanja

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{c\cos\alpha + V_d}{d} - \frac{c\cos\alpha - V_d}{d} = \frac{2V_d}{d}, \tag{6.54}$$

dobijamo izraz za komponentu vetra paralelnu putanji TR.

$$V_d = \frac{d}{2}(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2}). \tag{6.55}$$

PRIMER 6.3 *Izračunajte rezoluciju za brzinu zvučnog anemometra koji meri vreme prolaska zvuka sa tačnošću od* 0.1 μs*, ako je rastojanje od predajnika do prijemnika* 20 cm*.*

rešenje: *Iz jednačine* (6.51) *razlika vremena putovanja je*

$$t_2 - t_1 = \frac{2dV_d}{c^2\cos^2\alpha - V_d^2} \approx \frac{2dV_d}{c^2}.$$

Ako je tačnost određivanja ove razlike, $\Delta(t_2 - t_1)$*, jednaka* 0.1 μm*, rezolucija brzine je*

$$\Delta V_d = \frac{c^2}{2d}\Delta(t_2 - t_1) = \frac{343^2\ \mathrm{m^2 s^{-2}}}{2 \times 0.2\ \mathrm{m}} \times 10^{-7}\ \mathrm{s} = 3\ \mathrm{cms^{-1}}.$$

Ako zvučni anemometar pravi 200 merenja po sekundi i ako se osrednjavanje vrši preko 10 merenja, tada u jednom sekundu postoji 20 osrednjenih rezultata. Tačnost merenja zvučnih anemometara je obično 1 $\mathrm{cms^{-1}}$, a opseg od -30 do 30 $\mathrm{ms^{-1}}$.

Zvučni anemometri su dosta skuplji od jednostavnih mehaničkih senzora, i troše više električne struje. Pri jakoj kiši i vlažnom snegu može doći do slabljenja signala.

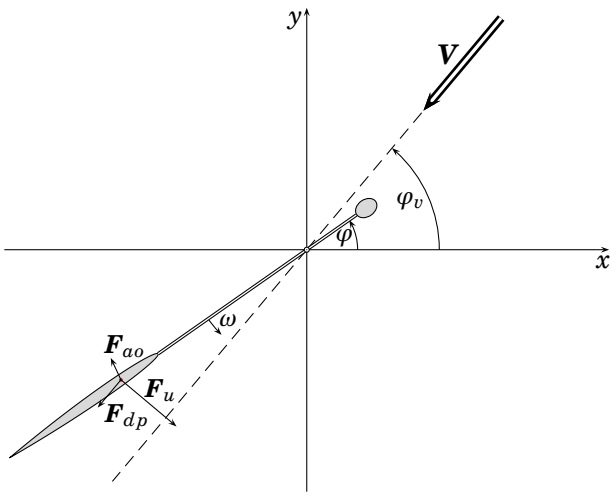
6.2 Merenje pravca vetra

Smer vetra se meri vetrokazima (vetruljama). Oni mogu da imaju različit oblik i veličinu. Najčešće su u obliku ravne pločice ili aeroprofila. Vetrulja rotira oko vertikalne ose i u stanju statičke ravnoteže orijentisana je u smeru vetra. Kontrateg uravnotežava vetrulju u odnosu na osu rotacije. Električnim pretvaračem, koji je najčešće potenciometar postavljen koncentrično oko vertikalne osovine, azimutni ugao se konvertuje u električni napon. Prikaz vetrulje u polju vetra dat je na slici 6.8. Ugao vetrulje u odnosu na pozitivni deo x ose je φ, a vetra φ_v.

Osetljivost vetrulja je uglavnom funkcija njihovog oblika, mase i površine. Za opisivanje kretanja vetrulja koriste se zakoni rotacionog kretanja. Na vetrulju, koja se nalazi u vazdušnoj struji, deluju sledeće sile (Kacurin, 1985):

- sila inercije, čiji je moment $I\frac{d^2\varphi}{d\tau}$, I je moment inercije vetrulje u odnosu na osu rotacije vetrulje, φ je ugao obrta vetrulje, τ vreme;
- sila trenja, čiji je moment $k_1\frac{d\varphi}{d\tau}$, k_1 je koeficijent trenja;
- sila dinamičkog pritiska sa momentom (koji deluje stabilizujuće) $k_2(\varphi - \varphi_v)$, k_2 je koeficijent dinamičkog pritiska, $\varphi - \varphi_v$ je ugao između vetrulje i pravca vazdušnog toka;
- sila aerodinamičkog otpora, sa momentom $k_3\frac{d}{d\tau}(\varphi - \varphi_v)$, gde je k_3 koeficijent dinamičkog otpora.

Koeficijenti k_2 i k_3 zavise od oblika vetrulje, proporcionalni su površini repnog dela vetrulje, povećavaju se sa porastom brzine vazduha i sa povećanjem ra-



Slika 6.8: Šematski prikaz vetrulje u polju vetra. Na aerodinamički centar krila deluju sila uzgona, $\boldsymbol{F}_u$, sila dinamičkog pritiska, $\boldsymbol{F}_{dp}$ i sila aerodinamičkog otpora, $\boldsymbol{F}_{ao}$. Takođe postoji sila trenja u osovini rotacije.

stojanja između ose rotacije i centra mase repnog dela vetrulje, s tim da se k_2 povećava mnogo brže.

Jednačinu kretanja vetrulje možemo da napišemo u obliku

$$I\frac{d^2\varphi}{d\tau^2}+k_1\frac{d\varphi}{d\tau}+k_3\frac{d}{d\tau}(\varphi-\varphi_v)+k_2(\varphi-\varphi_v)=0. \tag{6.56}$$

Posmatraćemo dva slučaja. U oba slučaja brzina vetra će biti konstantna, tako da se koeficijenti k_2 i k_3 neće menjati. U prvom slučaju biće konstantan i smer vetra ($\varphi_v = const.$), a u drugom smer vetra će se menjati periodično.

I ***slučaj***: $\varphi_v = const. = 0$, pa jednačina vetrulje postaje

$$I\frac{d^2\varphi}{d\tau^2}+\underbrace{(k_1+k_3)}_{k}\frac{d\varphi}{d\tau}+k_2\varphi=0. \tag{6.57}$$

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2}+\frac{k}{I}\frac{d\varphi}{d\tau}+\frac{k_2}{I}\varphi=0. \tag{6.58}$$

Rešenje ćemo tražiti u obliku $\varphi = Ce^{r\tau}$. Karakteristična jednačina je

$$Ir^2+kr+k_2=0, \tag{6.59}$$

a njeni koreni

$$r_{1/2}=\frac{-k\pm\sqrt{k^2-4Ik_2}}{2I}=-\frac{k}{2I}\pm\frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{k}{I}\right)^2-4\frac{k_2}{I}}. \tag{6.60}$$

Ograničićemo se na rešenje za koje je potkorena veličina u jednačini (6.60) manja od nule. To rešenje odgovara slabom prigušenju i periodičnom kretanju vetrulje. Iz (6.60) imamo

$$r_{1/2}=-\frac{k}{2I}\pm\frac{i}{2}\sqrt{4\frac{k_2}{I}-\left(\frac{k}{I}\right)^2}, \tag{6.61}$$

pa je rešenje u obliku

$$\varphi = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau}. \tag{6.62}$$

Konstante C_1 i C_2 odredićemo iz početnih uslova: u početnom trenutku ($\tau = 0$) ugao vetrulje je φ_o ($\varphi = \varphi_o$) i vetrulja miruje ($\frac{d\varphi}{d\tau} = 0$). Na osnovu ovoga iz (6.62) imamo

$$\varphi_o = C_1 e^0 + C_2 e^0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_o = C_1 + C_2 \tag{6.63}$$

i

$$\begin{aligned}
&\frac{d\varphi}{d\tau} = C_1 r_1 e^0 + C_2 r_2 e^0 = 0 \quad \Rightarrow \quad C_1 r_1 + C_2 r_2 = 0 \quad \Leftrightarrow \\
&-C_1 \frac{k}{2I} + i\frac{C_1}{2}\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2} - C_2 \frac{k}{2I} - i\frac{C_2}{2}\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2} = 0 \quad \Leftrightarrow \\
&-\underbrace{(C_1 + C_2)}_{\varphi_o}\frac{k}{2I} + i\frac{C_1 - C_2}{2}\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2} = 0 \quad \Rightarrow \\
&i(C_1 - C_2) = \frac{\frac{k\varphi_o}{I}}{\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}}.
\end{aligned} \tag{6.64}$$

Jednačinu (6.62) napisaćemo u obliku

$$\begin{aligned}
\varphi =& C_1 e^{-\frac{k}{2I}\tau} e^{\frac{i}{2}\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau} + C_2 e^{-\frac{k}{2I}\tau} e^{-\frac{i}{2}\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau} \quad \Leftrightarrow \\
\varphi =& C_1 e^{-\frac{k}{2I}\tau}\left(\cos\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau + i\sin\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau\right) + \\
& C_2 e^{-\frac{k}{2I}\tau}\left(\cos\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau - i\sin\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau\right) \quad \Rightarrow \\
\varphi =& (C_1 + C_2)e^{-\frac{k}{2I}\tau}\cos\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau + i(C_1 - C_2)e^{-\frac{k}{2I}\tau}\sin\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau.
\end{aligned} \tag{6.65}$$

Zamenom $C_1 + C_2$ i $i(C_1 - C_2)$ iz jednačina (6.63) i (6.64) u jednačinu (6.65) dobijamo

$$\begin{aligned}
\varphi =& e^{-\frac{k}{2I}\tau}\varphi_o\cos\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau + e^{-\frac{k}{2I}\tau}\frac{\frac{k\varphi_o}{I}}{\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}}\sin\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau \quad \Leftrightarrow \\
\varphi =& \varphi_o e^{-\frac{k}{2I}\tau}\left(\cos\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau + \frac{\frac{k}{I}}{\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}}\sin\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\tau\right).
\end{aligned} \tag{6.66}$$

Jednačinu (6.66) treba da napišemo u obliku

$$\varphi = \varphi_o e^{-\frac{\tau}{\lambda}} A\cos\left(\frac{2\pi}{p_s}\tau + \psi\right). \tag{6.67}$$

Poređenjem dve poslednje jednačine dobijamo da je koeficijent inercije vetrulje $\lambda = \frac{2I}{k}$. Kako je

$$A\cos(\frac{2\pi}{p_s}\tau + \psi) = A\cos(\frac{2\pi}{p_s}\tau)\cos\psi - A\sin(\frac{2\pi}{p_s}\tau)\sin\psi, \tag{6.68}$$

iz jednačine (6.66) dobijamo

$$A\cos(\frac{2\pi}{p_s}\tau)\cos\psi = \cos\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\,\tau, \tag{6.69}$$

i

$$-A\sin(\frac{2\pi\tau}{p_s})\sin\psi = \frac{\frac{k}{I}}{\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}}\sin\sqrt{\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2}\,\tau. \tag{6.70}$$

Iz (6.69) $\Rightarrow$

$$\mathrm{A}\cos\psi = 1, \tag{6.71}$$

a iz (6.70) $\Rightarrow$

$$-A\sin\psi = \frac{\frac{k}{I}}{\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}} \tag{6.72}$$

Deobom jednačine (6.72) sa jednačinom (6.71) dobijamo

$$-\mathrm{tg}\,\psi = \frac{\frac{k}{I}}{\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}} \quad \Rightarrow \quad \psi = \mathrm{arctg}\left(\frac{-\frac{k}{I}}{\sqrt{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}}\right), \tag{6.73}$$

a sabiranjem njihovih kvadrata

$$A^2\sin^2\psi + A^2\cos^2\psi = \frac{\frac{k^2}{I^2}}{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2} + 1, \tag{6.74}$$

odnosno

$$A = \sqrt{1 + \frac{k^2/I^2}{4\frac{k_2}{I} - \left(\frac{k}{I}\right)^2}} \quad \Leftrightarrow \quad A = \sqrt{1 + \frac{1}{4\frac{I^2}{k^2}\left[\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}\left(\frac{k}{I}\right)^2\right]}} \tag{6.75}$$

Iz jednačine (6.69), ili (6.70),

$$\frac{2\pi}{p_s}\tau = \left[\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}(\frac{k}{I})^2\right]^{1/2}\tau, \tag{6.76}$$

pa je period oscilacija vetrulje

$$p_s = \frac{2\pi}{\left[\frac{k_2}{I} - \frac{1}{4}(\frac{k}{I})^2\right]^{1/2}}. \tag{6.77}$$

Jednačinu kretanja vetrulje (6.58) možemo da napišemo u obliku

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + 2\xi\omega_n\frac{d\varphi}{d\tau} + \omega_n^2\varphi = 0, \tag{6.78}$$

gde su ω_n i ξ definisani izrazima

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_2}{I}}, \quad \xi = \sqrt{\frac{k^2}{4k_2 I}}. \tag{6.79}$$

Period oscilacija, amplituda, koeficijent inercije vetrulje i fazni pomak, napisani preko članova ω_n i ξ, su

$$\begin{aligned} p_s &= \frac{2\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}} \\ A &= \sqrt{\frac{1}{1-\xi^2}} \\ \lambda &= \frac{1}{\omega_n\xi} \\ \psi &= \text{arctg}\,\frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \end{aligned} \tag{6.80}$$

a rešenje (6.67)

$$\varphi = \varphi_o e^{-\omega_n\xi\tau}\sqrt{\frac{1}{1-\xi^2}}\cos\left[\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau + \text{arctg}\left(\frac{-\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)\right]. \tag{6.81}$$

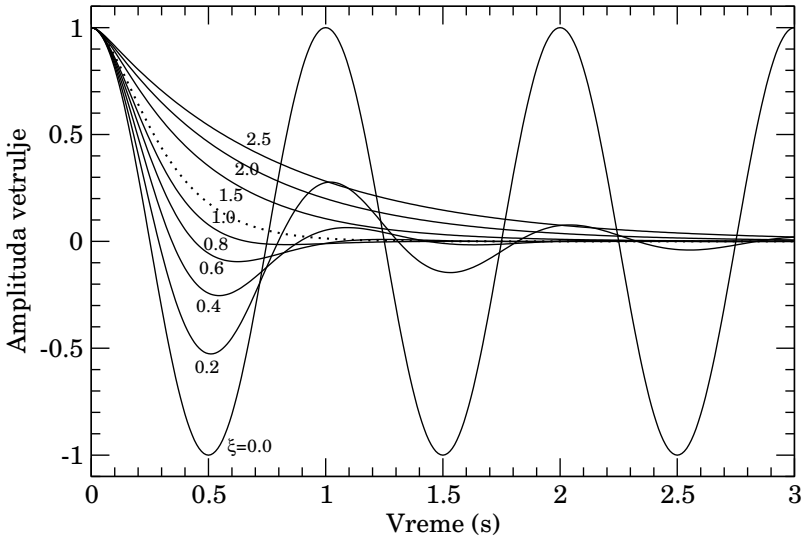
Kada je $\xi = 0$, $\varphi = \varphi_o\cos(\omega_n\tau)$, oscilacije vetrulje nisu prigušene i ona osciluje frekvencijom $\omega_n\sqrt{1-0} = \omega_n$. Zbog toga se veličina ω_n naziva ***prirodna frekvencija*** vetrulje. Veličina ξ se naziva ***koeficijent prigušenja***, jer od njega zavisi brzina prigušenja oscilacija. Korene jednačine (6.59) možemo da napišemo preko veličina ω_n i ξ u obliku

$$r_{1/2} = -\omega_n\xi \pm \omega_n\sqrt{\xi^2-1}. \tag{6.82}$$

Odavde vidimo da će kretanje vetrulje biti oscilatorno ukoliko je $\xi < 1$. Za $\xi > 1$ vetrulja neće oscilovati već će postojati monotona promena njenog ugla od početne do krajnje vrednosti. Tada će rešenje biti

$$\varphi = \frac{\varphi_o}{2}(1 + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2-1}})e^{-\omega_n(\xi-\sqrt{\xi^2-1})\tau} + \frac{\varphi_o}{2}(1 - \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2-1}})e^{-\omega_n(\xi+\sqrt{\xi^2-1})\tau}. \tag{6.83}$$

Rešenja (6.81) i (6.83) su prikazana na slici 6.9. Amplituda vetrulje za kritičnu vrednost koeficijenta prigušenja, $\xi = 1$, prikazana je tačkastom linijom.



Slika 6.9: Amplituda oscilovanja vetrulje, pri stepenastom inputu ($\varphi_o = 1$, $\partial\varphi/\partial\tau(0) = 0$), za različite vrednosti koeficijenta prigušenja, ξ.

II ***slučaj***: Intenzitet vetra je konstantan, a pravac se menja sinusoidalno, $\varphi_v = \varphi_{vo}\sin\omega\tau$. Jednačina kretanja vetrulje, koja odgovara ovom slučaju, je

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + 2\xi\omega_n\frac{d\varphi}{d\tau} + \omega_n^2\varphi = \omega_n^2\varphi_{vo}\sin\omega\tau. \tag{6.84}$$

Kako se pravac vetra menja periodično, treba očekivati da će stacionarno kretanje vetrulje takođe biti periodično, sa istom frekvencijom ω. Stacionarno rešenje ćemo tražiti u obliku

$$\varphi = k_1\sin\omega\tau + k_2\cos\omega\tau. \tag{6.85}$$

Zamenom probnog rešenja u jednačinu (6.84) dobijamo

$$\begin{aligned}&-k_1\omega^2\sin\omega\tau - k_2\omega^2\cos\omega\tau + 2\xi\omega_n(k_1\omega\cos\omega\tau - k_2\omega\sin\omega\tau) + \omega_n^2(k_1\sin\omega\tau + \\ &k_2\cos\omega\tau) = \omega_n^2\varphi_{vo}\sin\omega\tau,\end{aligned} \tag{6.86}$$

i izjednačavanjem članova uz $\sin\omega\tau$ i $\cos\omega\tau$

$$\begin{aligned}&-k_1\omega^2 - 2\xi\omega_n\omega k_2 + \omega_n^2 k_1 = \omega_n^2\varphi_{vo}\\ &-k_2\omega^2 + 2\xi\omega_n\omega k_1 + \omega_n^2 k_2 = 0,\end{aligned} \tag{6.87}$$

ili

$$\begin{aligned}&\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]k_1 - 2\xi\frac{\omega}{\omega_n}k_2 = \varphi_{vo}\\ &2\xi\frac{\omega}{\omega_n}k_1 + \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]k_2 = 0.\end{aligned} \tag{6.88}$$

Odavde, rešenja za koeficijente k_1 i k_2 su

$$k_1 = \varphi_{vo} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$
$$k_2 = -\varphi_{vo} \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}. \tag{6.89}$$

Zgodno je da se rešenje (6.85) napiše u obliku

$$\varphi = k_3 \sin(\omega\tau + \phi). \tag{6.90}$$

Poređenjem (6.90) i (6.85) [§§] dobijamo

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{k_2}{k_1} = \operatorname{arctg} \frac{-2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \tag{6.91}$$

i

$$k_3 = \frac{\varphi_{vo}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}. \tag{6.92}$$

Prema tome, stacionarno rešenje za ugao vetrulje u polju vetra čiji se pravac menja sinusoidalno, je

$$\varphi = \frac{\varphi_{vo}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \sin\left(\omega\tau + \operatorname{arctg} \frac{-2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}\right). \tag{6.93}$$

Dobijeno rešenje je prikazano na slici 6.10.

Opšte rešenje jednačine (6.84), φ, možemo da dobijemo kao zbir rešenja odgovarajuće homogene jednačine, φ_h, i partikularnog rešenja. Za partikularno rešenje ćemo uzeti dobijeno stacionarno rešenje, φ_s. Opšte rešenje jednačine je

$$\varphi = \varphi_h + \varphi_s = C_1 e^{r_1 \tau} + C_2 e^{r_2 \tau} + A \sin(\omega\tau + \phi), \tag{6.94}$$

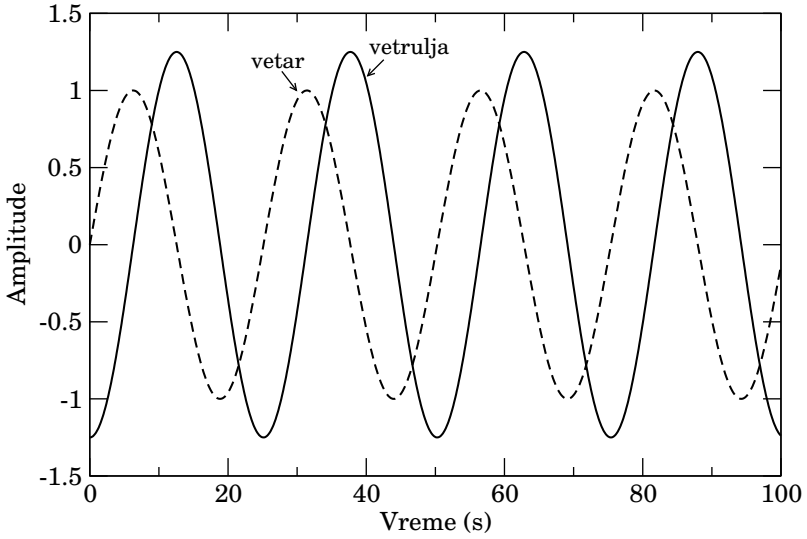
$r_{1/2}$ su dati jednačinom (6.82),

$$A = \frac{\varphi_{vo}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4\xi^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

---

§§

$$a \sin x + b \cos x = c \sin(x + \phi) = c \sin x \cos\phi + c \cos x \sin\phi \quad \Rightarrow:$$
$$\left.\begin{array}{l} a = c\cos\phi \\ b = c\sin\phi \end{array}\right\} \quad \Rightarrow \quad \operatorname{tg}\phi = \frac{b}{a} \Rightarrow \phi = \operatorname{arctg}\frac{b}{a},\ c = \sqrt{a^2 + b^2}$$



Slika 6.10: Amplituda oscilovanja vetrulje pri sinusoidnom inputu (puna linija) i amplituda oscilovanja vetra (isprekidana linija). Korišćene su sledeće vrednosti: $\varphi_{vo} = 1$, $\xi = 0.4$, $\omega = \omega_n = 0.25$.

i

$$\phi = \text{arctg}\,\frac{-2\xi\frac{\omega}{\omega_n}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}.$$

Ako su brzina i pravac vetra bili konstantni, ugao vetrulje će se poklapati sa pravcem vetra. Neka je taj ugao $\varphi = \varphi_v = 0$. Ako je pravac vetra u vremenu koje ćemo obeležiti sa $\tau = 0$, počeo da se menja prema $\varphi_v = \varphi_{vo}\sin\omega\tau$, a intenzitet ostao isti, vetrulja će u $\tau = 0$ imati pravac $\varphi(0) = 0$ i neće se kretati $\frac{d\varphi}{d\tau}(0) = 0$. Diferenciranjem jednačine (6.94) dobijamo ugaonu brzinu vetrulje

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = C_1 r_1 e^{r_1\tau} + C_2 r_2 e^{r_2\tau} + A\omega\cos(\omega\tau+\phi). \tag{6.95}$$

Zamenom početnih uslova u (6.94) i (6.95) dobijamo dve jednačine

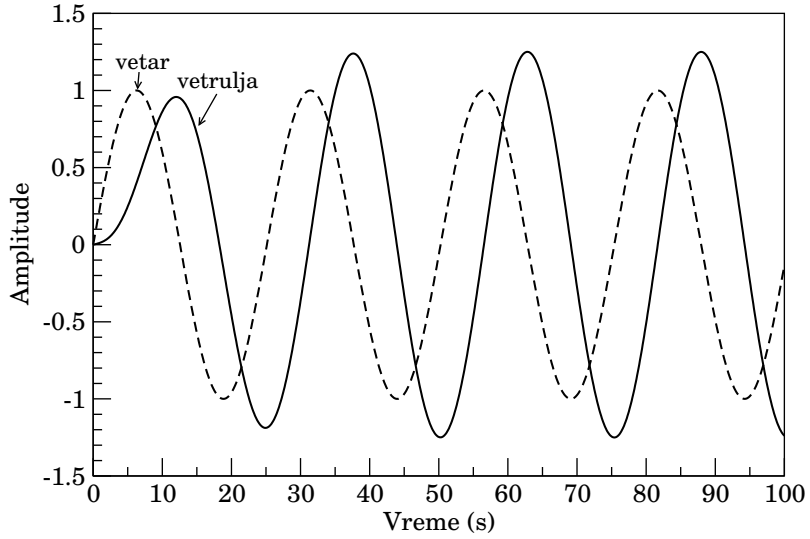
$$\begin{aligned} &\varphi(0) = C_1 + C_2 + A\sin\phi = 0,\\ &\frac{d\varphi}{d\tau}(0) = C_1 r_1 + C_2 r_2 + A\omega\cos\phi = 0, \end{aligned} \tag{6.96}$$

iz kojih računamo konstante C_1 i C_2

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{A(\omega\cos\phi - r_2\sin\phi)}{r_2 - r_1},\\ C_2 &= \frac{A(r_1\sin\phi - \omega\cos\phi)}{r_2 - r_1}. \end{aligned} \tag{6.97}$$

Traženo rešenje je

$$\varphi = \frac{A}{r_2-r_1}e^{-\omega_n\xi\tau}\left[(\omega\cos\phi - r_2\sin\phi)e^{i\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau} + (r_1\sin\phi - \omega\cos\phi)e^{-i\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau}\right] + A\sin(\omega\tau+\phi).$$



Slika 6.11: Opšte rešenje za amplitudu oscilovanja vetrulje pri sinusoidnom inputu (puna linija) i amplituda oscilovanja vetra (isprekidana linija). Korišćene su sledeće vrednosti: $\varphi_{vo} = 1$, $\xi = 0.4$, $\omega = \omega_n = 0.25$.

(6.98)

Sređivanjem dobijenog rešenja i uzimajući da je

$$r_2 - r_1 = -i2\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad \text{i} \quad r_2 + r_1 = -2\omega_n\xi,$$

opšte rešenje kretanja vetrulje je

$$\varphi = -Ae^{-\omega_n\xi\tau}\left[\frac{\cos\phi\sin(\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau)}{\sqrt{1-\xi^2}} + \sin\phi\cos(\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin\phi\sin(\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau)\right] + A\sin(\omega\tau+\phi).$$

(6.99)

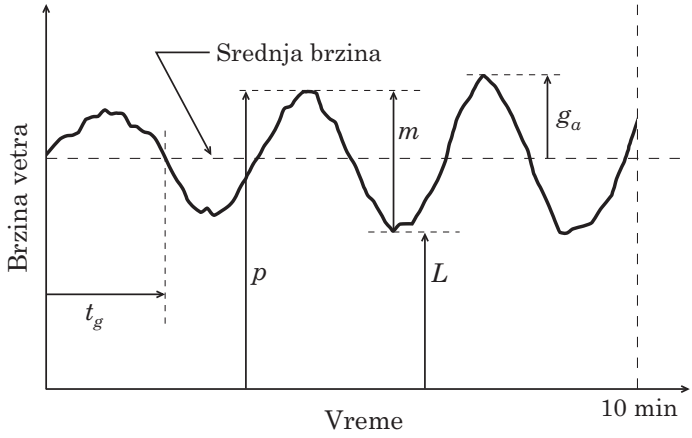
U specijalnom slučaju, kada je $\omega = \omega_n$, $\phi = \text{arctg}(-\infty) = -\frac{\pi}{2}$, rešenje je

$$\varphi = Ae^{-\omega_n\xi\tau}\left[\cos(\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau) + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\sin(\omega_n\sqrt{1-\xi^2}\tau)\right] + A\sin(\omega\tau+\phi). \quad (6.100)$$

Ovo rešenje je prikazano na slici 6.11

6.3 Izlaganje anemometara

Prema standardu Svetske meteorološke organizacije, visina na kojoj se meri vetar pri površini je 10 m. Anemometar mora da ima dobar položaj u svim pravcima unutar kruga poluprečnika oko 3 km. Rastojanje anemometra od prepreke treba da je najmanje 20 puta veće od visine prepreke. Zbog postojanja poremećenja u polju vetra, koje izazivaju zgrade, anemometar ne treba da bude na krovu



Slika 6.12: Ilustracija definicija WMO za udare vetra.

zgrade. Retka su merna mesta koja ispunjavaju sve propisane standarde. Fotografije terena u svim pravcima oko mernog mesta mogu da daju informacije o postojanju prepreka koje utiču na vetar. Zbog sezonskih efekata trebalo bi napraviti fotografije u letnjem i u zimskom periodu.

Ostale smetnje u radu instrumenata za merenje vetra mogu da izazovu nagomilavanje snega, zamrzavanje, ekstremno niske i visoke temperature, jaki udari vetra, lomljenje zbog zamora materijala u turbulentnom vetru, korozija izazvana padavinama i velikom vlažnošću, opterećenje od vetra (koje utiče i na sam anemometar i na platformu na kojoj je montiran) i udari groma.

6.4 Obrada podataka o vetru

Prema standardu WMO, vreme osrednjavanja za vetar je 10 minuta. Tipičnom obradom se računaju srednja brzina i srednji pravac vetra za svakih 10 minuta. U okviru svakog desetominutnog perioda osrednjavanja, neki sistemi računaju brzinu i pravac maksimalnog trosekundnog vetra i jednominutnog vetra i standardnu devijaciju brzine i pravca u datom periodu osrednjavanja. Trosekundna brzina vetra je srednja brzina vetra za vreme od 3 sekunde. Za primene u inžinjerstvu, kao što su računanje sile pritiska vetra na objekte, ponekad je korisno osrednjiti kvadrat brzine vetra, dok je srednji kub brzine vetra potreban za vetroelektrane.

Pravac vetra se mora pažljivo osrednjavati, s obzirom na to da postoji diskontinuitet na $0° = 360°$. Jednostavno osrednjavanje pravca vetra, u slučaju kada vetar fluktuira oko severa, će dati južni vetar; na primer, $(5° + 355°)/2 = 180°$. To može potencijalno da bude problem uvek kada se koristi vetrokaz. Uobičajeno rešenje je da se pre osrednjavanja vrši konverzija trenutne brzine i pravca (polarne koordinate) u u i v komponente brzine. Nakon osrednjavanja se, ako je potrebno, srednji vetar u pravouglim koordinatama može konvertovati nazad u polarni koordinatni sistem. Ovaj proces daje vektor srednje brzine i pravca. WMO je propisala skup definicija za udare vetra i one su ilustrovane na slici 6.12:

- p - najveća brzina udara: brzina vetra koja odgovara pozitivnoj amplitudi udara,
- t_g - trajanje udara: vremenski interval od početka do kraja udara,
- m - magnituda (intenzitet) udara: skalarna razlika između najveće brzine udara i susedne najmanje brzine,
- frekvencija udara: broj pozitivnih udara u jedinici vremena,
- g_a - amplituda udara: razlika maksimalne brzine udara i srednje brzine vetra,
- L - brzina najslabijeg vetra.

Glava 7

Merenje zračenja

U ovom poglavlju će biti prikazani načini merenja sunčevog zračenja koje dolazi do površine Zemlje i dugotalasnog zračenja koje emituju Zemlja i oblaci.

7.1 Definicije

- ***Fluks zračenja*** ili ***snaga zračenja*** je količina zračenja koju emituje izvor zračenja u jedinici vremena, W.
- ***Intenzitet zračenja*** je fluks zračenja koji emituje jedna tačka na izvoru, po jedinici prostornog ugla prostora koji okružuje tu tačku, u Wsr^{-1} (sr je oznaka za steradijan, jedinicu prostornog ugla).
- ***Radijansa*** je fluks zračenja koji emituje jedinična površina izvora zračenja, ili koji se raspe na jediničnoj površini u $\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{sr}^{-1}$.
- ***Iradijansa*** je fluks zračenja koje dolazi na jediničnu prijemnu površinu u jedinici vremena iz prostornog ugla 2π (to je prostorni ugao polusfere).
- ***Apsorptivnost***, ***refleksivnost*** i ***transmisivnost*** su delovi dolaznog zračenja koji su apsorbovani, reflektovani ili propušteni od strane sredine.
- ***Globalno sunčevo zračenje*** je sunčeva iradijansa koju prima horizontalna površina, Wm^{-2}. Globalno sunčevo zračenje je zbir direktnog zračenja Sunca i difuznog zračenja i meri se ***piranometrom***.
- ***Direktno sunčevo zračenje*** je zračenje koje se emituje iz prostornog ugla sunčevog diska, a koje primi površina normalna na osu tog prostornog ugla (konusa), i čine ga uglavnom nerasuto i nereflektovano zračenje Sunca u Wm^{-2}. Na vrhu atmosfere ono iznosi 1367 $\mathrm{Wm}^{-2} \pm 3\%$ zbog promena u orbiti Zemlje i promena na površini Sunca. Direktno zračenje je smanjeno zbog apsorpcije i rasipanja u atmosferi. Direktno zračenje Sunca se meri ***pirheliometrom***.
- ***Difuzno sunčevo zračenje*** (zračenje neba) je na dole rasuto ili reflektovano zračenje koje dolazi iz cele polusfere, izuzimajući prostorni ugao sunčevog diska, Wm^{-2}. Difuzno zračenje se može meriti piranometrom sa

senilom, ili se može izračunati kao razlika globalnog i direktnog sunčevog zračenja.

- ***Vidljivo zračenje*** je zračenje talasne dužine između 400 nm i 730 nm.
- ***Ultraljubičasto zračenje*** je zračenje talasne dužine u opsegu od 100 nm do 400 nm. Podeljeno je na tri podopsega:
  - UVA od 315 do 400 nm,
  - UVB od 280 do 315 nm i
  - UVC od 100 do 280 nm.
- ***Infracrveno zračenje*** je zračenje talasne dužine veće od 740 nm.
- ***Fotosintetički aktivno zračenje*** je deo sunčevog zračenja sa talasnim dužinama od 400 nm do 700 nm koje koriste biljke u porocesu fotosinteze. Fotosintetički aktivno zračenje se obično meri u molovima fotona, jedan mol je Avogadrov broj ($\mathrm{Na} = 6.022 \times 10^{23}$) fotona.

7.1.0.0.1 Sunčevo i zemljino zračenje Crno telo je telo koje na datoj temperaturi, na svim talasnim dužinama, emituje najviše zračenja u odnosu na bilo koji drugi objekat iste temperature. ***Monohromatska iradijansa*** koju emituje crno telo, u jedinicama Wm^{-3}, data je Plankovim zakonom:

$$E^*_\lambda = \frac{2\pi h c^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}, \tag{7.1}$$

gde su T temperatura, λ talasna dužina, $h = 6.62606957 \times 10^{-34}$ Js Plankova konstanta, k Bolcmanova konstanta i c je brzina svetlosti u vakuumu. E^*_λ je zračenje koje emituje crno telo po jedinici površine u intervalu talasnih dužina $d\lambda$. Eksponent * označava crno telo. Maksimalna iradijansa crnog tela, na datoj temperaturi, je na talasnoj dužini λ_m. Ova talasna dužina se računa Vinovim zakonom pomeranja

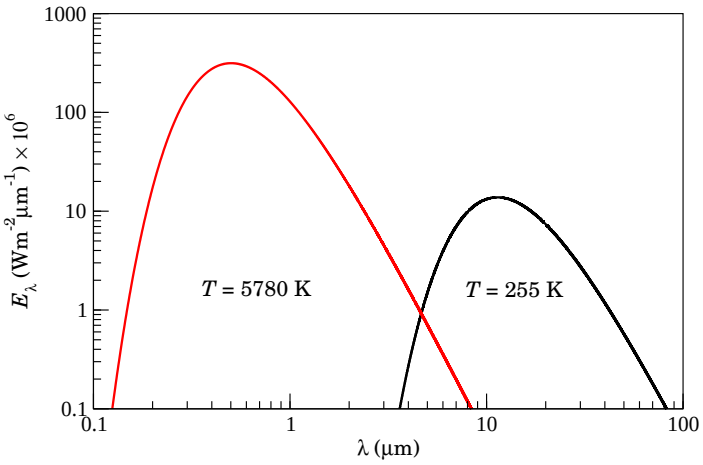
$$\lambda_m = \frac{2898}{T}\ \mu\mathrm{m}. \tag{7.2}$$

Vinov zakon se dobija nalaženjem maksimuma E^*_λ u funkciji λ iz Plankovog zakona.

PRIMER 7.1 *Ako je temperatura na površini Sunca 5780* K*, talasna dužina maksimalnog zračenja je*

$$\lambda_m = \frac{2898}{5780} = 0.501\ \mu\mathrm{m}.$$

Na ovoj talasnoj dužini monohromatska iradijansa je $8.301 \times 10^{13}\ \mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$. *Ovo je iradijansa Sunca u intervalu talasne dužine od* 1 μm.
Neka je temperatura Zemlje 255 K*; tada je maksimalno zračenje Zemlje na talasnoj dužini od* 11.36 μm. *Monohromatska iradijansa crnog tela ove temperature je* $1.387 \times 10^7\ \mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$



Slika 7.1: Monohromatske iradijanse Sunca (levo) i Zemlje (desno) u $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ prikazane na logaritamskoj apscisnoj osi. Monohromatska iradijansa Sunca je pomnožena korekcionim faktorom $C_s = 3.81 \times 10^{-6}$.

Ukupna energija koju emituje crno telo po jedinici površine je

$$E^* = \int_0^\infty E^*_\lambda d\lambda = \sigma T^4, \tag{7.3}$$

gde je $\sigma = 5.6696 \times 10^{-8}$ $\mathrm{Wm}^{-2}\mathrm{K}^{-4}$ Štefan-Bolcmanova konstanta. Stvarna tela nisu crna tela, već „siva“ i emituju zračenje po zakonu

$$E = \varepsilon\sigma T^4, \tag{7.4}$$

gde je ε emisivnost i ima vrednost u opsegu od $0 < \varepsilon < 1$. Apsorptivnost nekog tela, a, jednaka je emisivnosti i njena vrednost je u opsegu $0 < a < 1$.

Sunce maksimalno emituje na talasnoj dužini 0.5 μm, pretpostavljajući da zrači kao crno telo temperature 5780 K. Zemlja zrači maksimalno na talasnoj dužini 11.4 μm sa ekvivalentnom temperaturom crnog tela od 255 K. Sva crna tela zrače na svim talasnim dužinama, i monohromatska iradijansa crnog tela temperature 5780 K je na svim talasnim dužinama veća od monohromatske iradijanse crnog tela temperature 255 K. ***Sunčevo*** (ili ***kratkotalasno*** zračenje) je zračenje talasne dužine $0.3\ \mu\mathrm{m} \le \lambda \le 4\ \mu\mathrm{m}$ i ***zemljino*** (ili ***dugotalasno***) zračenje je zračenje u intervalu $4\ \mu\mathrm{m} \le \lambda \le 50\ \mu\mathrm{m}$. Sunčevo i zemljino zračenje su prikazani na slici 7.1.

Na slici 7.1 ekvivalentna temperatura Zemlje je 255 K. To je temperatura koju treba da ima Zemlja da bi bila u radijacionoj ravnoteži sa Suncem. Na ovoj slici monohromatska iradijansa Sunca je korigovana faktorom

$$C_s = (1-A)\frac{R_s^2}{D_{es}^2}\frac{\pi R_e^2}{4\pi R_e^2} = 3.81 \times 10^{-6}, \tag{7.5}$$

$R_s = 7 \times 10^8$ m je poluprečnik Sunca, $D_{es} = 1.5 \times 10^{11}$ m je rastojanje Zemlje od Sunca, $A = 0.3$ je srednji albedo Zemlje i $R_e = 6.37 \times 10^6$ m je poluprečnik

Zemlje. Sa ovim podešavanjem dve krive se seku između 4 i 5 μm i obično se uzima da je presek na talasnoj dužini 4 μm. Zbog toga, za opseg talasnih dužina sunčevog zračenja se uzima $0 \leq \lambda \leq 4$ μm, a za zemljino zračenje opseg iznad 4 μm. Kako atmosfera Zemlje prigušuje zračenje talasnih dužina $\lambda < 0.3$ μm, za sunčevo zračenje se uzima zračenje talasnih dužina iz intervala 0.3 $\mu\text{m} \leq \lambda \leq 4$ μm i za zemljino zračenje 4 $\mu\text{m} \leq \lambda \leq 50$ μm.

PRIMER 7.2 *Proverite izračunatu vrednost korekcionog faktora sunčevog zračenja koristeći jednačinu (7.3).*

rešenje: *Ako je Zemlja u radijacionoj ravnoteži, tada je* $C_s \sigma T_s^4 = \sigma T_e^4$. *Odavde je*

$$C_s = \left(\frac{255}{5780}\right)^4 = 3.81 \times 10^{-6}.$$

7.2 Metodi merenja zračenja

Postoje dve osnovne vrste senzora koje se koriste za merenje zračenja: ***toplotni detektori*** koji reaguju na dobijanje toplote zbog arpsorpcije zračenja ili na gubitak toplote zbog emisije zračenja, i ***fotovoltni detektori*** koji konvertuju apsorbovano zračenje u električni napon.

Instrumenti za merenje zračenja mogu da se klasifikuju prema njihovoj upotrebi. Generičko ime za sve instrumente kojima se meri zračenje je ***radiometar***.

- ***Pirheliometar*** je instrument kojim se meri direktno sunčevo zračenje. Njegov senzor treba da je uvek normalan na zračenje i zato pirheliometar mora da bude usmeren ka Suncu.
- ***Piranometar*** se koristi za merenje globalnog sunčevog zračenja (direktnog i difuznog). Njegov prijemni element treba da bude postavljen horizontalno.
- ***Pirgeometar*** se koristi za merenje ukupnog dugotalasnog zemljinog zračenja.
- ***Pirradiometar*** meri ukupno globalno zračenje (kratkotalasno i dugotalasno).
- ***Neto pirradiometar*** ili ***neto radiometar*** je instrument kojim se meri razlika između dolaznog i odlaznog zračenja.
- ***Albedometar*** meri razliku između dolaznog i reflektovanog kratkotalasnog zračenja.

7.2.0.1 Pirheliometar

Pirheliometrom se meri direktno zračenje Sunca talasne dužine u intervalu 0.3 $\mu\text{m} \leq \lambda \leq 3$ μm. Vidno polje pirheliometra je oko 5°, što obuhvata Sunce i mali deo neba oko njega, tako da se meri baš direktno sunčevo zračenje, a najveći deo

rasutog nebeskog zračenja je isključen. Pirheliometar treba da bude neprekidno orijentisan prema Suncu. Glavni elementi pirheliometra su: cev kojom se vidno polje ograničava na oko 5°, toplotni detektor na kraju cevi i mehanizam koji omogućava da je instrument uvek orijentisan ka Suncu. Toplotni detektor je zatamnjena pločica sa senzorom temperature (termopar ili platinski otporni detektor). Pirheliometri se kalibrišu upoređivanjem sa ***apsolutnim pirheliometrom***.

7.2.0.1.1 Primarni standard pirheliometara Apsolutni pirheliometar može da meri iradijansu bez pomoći izvora zračenja. Pored osnovnih elemenata pirheliometra, apsolutni pirheliometar ima i električni grejač koji se nalazi pored toplotnog detektora. Instrument poredi toplotu dobijenu od Sunca sa toplotom koja se oslobodi pri prolasku izmerene količine struje kroz otpornik poznatih karakteristika. Jačina struje je podešena tako da je oslobođena toplota u otporniku jednaka količini toplote dobijene od Sunca.

Apsolutni pirheliometar je primarni standard ako ispunjava sledeće uslove:

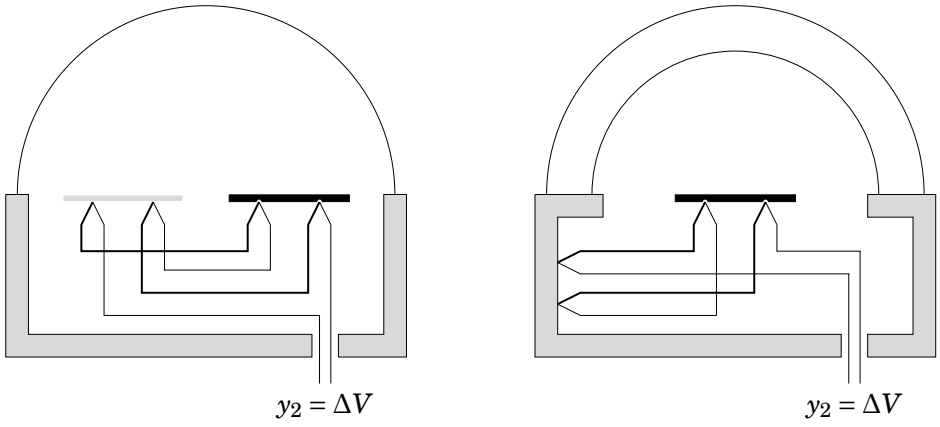
- Najmanje jedan instrument iz serije proizvedenih mora da ima potpune karakteristike. To se postiže ispitivanjem fizičkih osobina instrumenta i računanjem odstupanja od idealnog ponašanja. Na primer, pri računanju toplote koja se oslobađa u otporniku, trebalo bi uzeti u obzir promenu otpora pri promeni temperature otpornika i gubitke energije u provodnicima.
- Svaki instrument mora da se uporedi sa instrumentom koji ima potpune karakteristike.
- Mora da postoji detaljan opis rezultata tih poređenja, kao i detaljan opis karakteristika instrumenta.
- Kalibracija mora da bude u skladu sa WRR* (svetska radiometrijska referenca).

Jedan tip apsolutnog radiometra ima senzor u obliku konusa koji naizmenično može da bude izložen izvoru zračenja, kao što je Sunce, ili može da se zagreva električnim otpornikom u senzoru. Termoelement se koristi za merenje razlike temperature između konusnog senzora koji prima zračenje i drugog referentnog konusa koji ima iste karakteristike i nalazi se blizu prvog konusa. Iradijansa se može izračunati kao

$$E = KV_i \frac{P - C_2 I^2}{V_e}, \tag{7.6}$$

gde je E iradijansa u Wm^{-2}, K je faktor određen karakterizacijom, V_i izlazni signal toplotnog detektora kada je senzor izložen zračenju, V_e izlazni signal toplotnog detektora kada je senzor zagrevan električnom strujom, I jačina struje u otporniku, P energija oslobođena u otporniku i C_2 je faktor kojim se uzimaju u obzir gubici u provodnicima (oko 0.065).

*WRR je merni standard koji predstavlja SI jedinicu iradijanse. Uveden je sa ciljem da osigura homogenost merenja sunčevog zračenja širom sveta i koristi se od 1980. WRR je određen osrednjavanjem merenja dobijenih pomoću grupe od 15 apsolutnih radiometara sa potpunim karakteristikama.



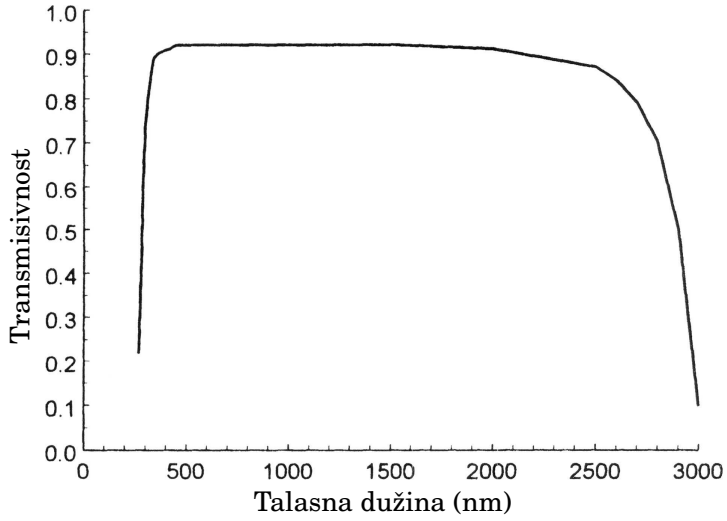
Slika 7.2: Dve verzije piranometra sa toplotnim detektorom. Na levoj strani je piranometar sa detektorom toplote u obliku crne i bele pločice. Piranometar na desnoj strani ima samo crnu pločicu. Razlika temperature crne pločice i bele pločice ili kućišta se meri termoelementom. Nacrtani termoelementi su sastavljeni od dva termopara. Stvarni broj termoparova u senzoru piranometra je od 10 do 100.

7.2.0.2 Piranometar

Toplotni detektori mere promenu temperature koja je izazvana dobijanjem (gubljenjem) toplote zbog apsorpcije (emisije) zračenja crne površine. Promena temperature se meri u odnosu na belu površinu ili u odnosu na kupolu instrumenta. Na slici 7.2 prikazane su dve verzije piranometra sa termoelementom. Termoelement je serijski povezan niz termoparova, obično 10 do 100. Termoelement ima veći izlazni napon od jednog termopara. Merna veličina je iradijansa sunčevog zračenja. Senzor je jedna termalna pločica (ili više njih), a neobrađeni izlaz je razlika temperature između pločice koja apsorbuje i pločice koja ne apsorbuje zračenje ili kupole instrumenta ($y_1 = \Delta T$). Termoelement konvertuje razliku temperature u razliku napona ($y_2 = \Delta V$). Ovo predstavlja oblik kondicioniranja analognog signala s obzirom na to da termoelement kombinuje više izlaznih signala pojedinačnih termoparova i formira kompozitni izlazni signal u obliku napona.

Zaštitna kupola piranometra može da bude izrađena od stakla, s obzirom na to da je staklo propusno za zračenje talasnih dužina od 0.25 μm do 2.8 μm. Sa natronskim staklom, koje se koristi u boljim instrumentima, gornja granica može da bude pomerena na 4.5 μm. Staklena kupola štiti crnu pločicu od uticaja vetra na gubljenje ili dobijanje toplote i od promena spektralnih karakteristika crne pločice koje bi mogle da nastanu njenim prljanjem. Neka površina koja je crna u vidljivoj oblasti spektra može da bude siva u infracrvenoj. Tipična osetljivost piranometra sa termoelementom je 4 μV/(Wm^{-2}), a tipična vremenska konstanta 5 s.

Piranometar sa crnom i belom pločicom meri razliku njihovih temperatura i obe pločice su izložene sunčevom zračenju. Pločice mogu da budu u obliku koncentričnih prstenova ili kružnih isečaka. U oba slučaja, bela i crna pločica su



Slika 7.3: Transmisivnost staklene kupole piranometra.

izložene istom zračenju i istoj okolnoj temperaturi, pa je za izolaciju senzora od vetra i kiše dovoljna obična staklena kupola. Zbog spektralnih karakteristika staklene kupole, koje su prikazane na slici 7.3, piranometar prima samo kratkotalasno ili sunčevo zračenje.

Kada je senzor piranometra samo crna pločica, tada se za referentnu temperaturu uzima temperatura njegovog kućišta. U tom slučaju se radi bolje izolacije koriste dve koncentrične staklene kupole. Spoljašnja staklena kupola se zagreva konvektivnim transportom toplote od okolnog vazduha i apsorpcijom infracrvenog zračenja, pa jedan deo te toplote zračenjem predaje crnoj pločici. Unutrašnja kupola služi da smanji količinu toplote koja se na ovaj način dovodi senzoru. Čak i kada postoje dve kupole moguće su greške zbog postojanja dugotalasnog zračenja. Da bi se korigovala ova greška često u piranometru postoji senzor za temperaturu smešten na osnovi kupole i on meri temperaturu kupole. Takođe postoji i senzor za merenje temperature kućišta piranometra. Temperatura kupole, T_d, i temperatura kućišta, T_c, se koriste za računanje korekcije zbog postojanja infracrvenog zračenja kupole

$$R_{lw} = R_p + \sigma T_c^4 - B\sigma(T_d^4 - T_c^4), \tag{7.7}$$

R_{lw} je korigovano merenje kratkotalasnog zračenja, R_p je sirovi autput termoelementa pomnožen osetljivošću i B je empirijski dobijen faktor kojim se uzima u obzir transmisivnost kupole.

7.2.0.2.1 Fotoelektrični detektori Fotonaponska ćelija se sastoji od poluprovodničkog materijala kao što je silicijum, kojem se u prvom sloju dodaju atomi fosfora (N-silicijum) za negativno naelektrisanje i bora (P-silicijum) u drugom za pozitivno naelektrisanje. Silicijum se koristi zato što ima pogodne karakteristike i ima ga dosta u prirodi. Atom silicijuma sadrži 14 elektrona u tri orbitale. Dve

unutrašnje orbitale su popunjene, a u trećoj se nalaze četiri od mogućih osam elektrona. Kada se spoje dva atoma silicijuma, formira se čvrsta veza u kojoj nema slobodnih elektrona. Zbog ovih čvrstih veza se u silicijum dodaju „nečistoće“ kao što su fosfor i bor. Atom fosfora ima 5 elektrona u spoljašnjoj orbitali, a veza između silicijuma i fosfora ostavlja jedan slobodan elektron. Kada svetlost deluje na ove atome, uz malo energije se oslobađa peti, slobodni elektron fosfora. Ovi elektroni slobodno putuju kroz kristalnu rešetku tražeći pogodno mesto na kom mogu da se ugrade. Na taj način se stvara strujni tok.

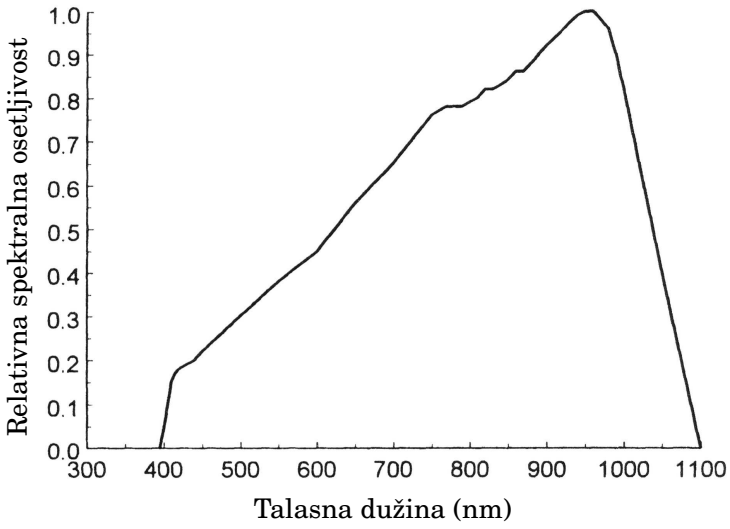
Drugi deo je dopovan borom, koji ima samo tri elektrona u svojoj spoljašnjoj orbitali i naziva se P-tipom silicijuma, zbog preovlađujućeg pozitivnog naelektrisanja. Ovakva struktura nema slobodne elektrone, ali ima jedno prazno mesto koje može da prihvati slobodan elektron koji „šeta“ po rešetki i tako stvara električnu struju.

Fotonaponski piranometar koristi silicijumski detektor koji je osetljiv na zračenje od 400 do 1100 nm. Spektralna osetljivost[†] ovog detektora, prikazana na slici 7.4, raste od 400 nm, dostiže maksimum na talasnoj dužini od oko 1000 nm, i zatim brzo opada do nule na 1100 nm. Zbog velike razlike u spektralnoj osetljivosti, fotonaponski detektor se mora kalibrisati pomoću visokokvalitetnog piranometra sa termoelementom. Kalibracija treba da se izvrši pod prirodnim dnevnim uslovima. Tipična kalibraciona greška je obično vrlo mala od 3% do 5%. Pri korišćenju fotonaponskog detektora implicitno se koristi pretpostavka da oblaci, dim i atmosferska vodena para uniformno oslabe svo kratkotalasno zračenje talasnih dužina iz opsega od 0.3 μm do 4 μm. Fotonski detektori su mnogo jeftiniji od detektora sa termoelementom. Međutim, oni se ne mogu koristiti za merenje ultraljubičastog i skoro-infracrvenog zračenja.

Kada se senilom zakloni direktno sunčevo zračenje, piranometar meri difuzno sunčevo zračenje. Senilo može da bude u obliku prstena i u obliku diska. Senilo u obliku prstena zaklanja Sunce u toku celog dana, a prilagođava se svakih nekoliko dana, u skladu sa geografskom širinom i nagibom Sunca. Senilo u obliku diska blokira zračenje koje dolazi iz prostornog ugla Sunca i pomoću posebnog uređaja, pratioca Sunca, se kontinuirano postavlja tako da uvek zaklanja piranometar. Kada se pored zaklonjenog koristi još jedan, nezaklonjeni piranometar, iz razlike njihovih merenja se može dobiti direktno sunčevo zračenje. Najtačnije merenje globalnog sunčevog zračenja se dobija sabiranjem difuznog sunčevog zračenja merenog piranometrom sa senilom i direktnog zračenja merenog pirheliometrom. Na taj način se izbegava uticaj zračenja kupole koje je posledica njenog zagrevanja sunčevim zračenjem.

Albedometar ili neto piranometar se sastoji od dva piranometra. Jedan od njih je orijentisan na gore i meri globalno sunčevo zračenje, a drugi, orijentisan na dole, meri reflektovano sunčevo zračenje. Deljenjem izmerenog reflektovanog sa izmerenim globanim zračenjem dobija se albedo.

[†]Spektralna osetljivost detektora zračenja je količnik veličine koja karakteriše nivo izlaznog signala detektora i fluksa monohromatskog zračenja koji uzrokuje reakciju detektora. Postoji razlika između apsolutne spektralne osetljivosti, koja se izražava u jedinicama, i relativne spektralne osetljivosti, koja je količnik spektralne osetljivosti na datoj talasnoj dužini i maksimalne spektralne osetljivosti ili spektralne osetljivosti na nekoj drugoj talasnoj dužini.



Slika 7.4: Relativna spektralna osetljivost silicijumskog detektora

7.2.0.3 Pirgeometar

Pirgeometrom se meri zemljino ili dugotalasno zračenje. Zbog toga se kao zaštita od spoljašnjih uticaja ne koristi staklena kupola već zaravljen silicijumski prozor. Prozori mogu biti izrađeni i od polietilena, ali su oni manje pouzdani i stabilni od silicijumskih. Opseg talasnih dužina zračenja koje se meri pirgeometrom je od 3 μm do 50 μm, a vidno polje je, zbog ravnog prozora, ograničeno na 150 stepeni. Kod ovih instrumenata potrebno je izvršiti temperaturnu korekciju. Najjednostavniji oblik korekcije je

$$E = a_1 V_1 + a_2 V_T, \tag{7.8}$$

a_1 i a_2 su konstante, V_1 je sirovi izlaz senzora i V_T je napon proporcionalan temperaturi senzora.

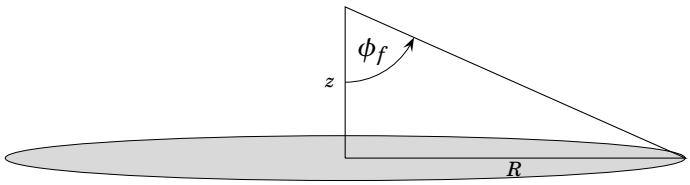
7.2.0.4 Pirradiometar

Pirradiometri mere ukupno globalno zračenje (globalno sunčevo + globalno dugotalasno). Kupole od stakla ne mogu da se koriste zbog toga što staklo nije transparentno za zračenje talasnih dužina iznad oko 2.8 μm.

7.3 Izlaganje

Zahtevi koji su zajednički svim instrumentima za merenje zračenja su:

- Pojave magle, smoga i zagađenja vazduha na mernom mestu treba da odgovaraju karakterističnim vrednostima okoline.
- Kupole instrumenata moraju da budu čiste. Njihova transparentnost može da bude smanjena zbog kiše, prašine, rose i izmeta ptica. Na glavnim stanicama instrumenti bi morali svakodnevno da se čiste, a aspiratori bi trebalo



Slika 7.5: Šematski prikaz površine tla sa koje do radiometra dolazi zračenje iz zenitnog ugla $0 \leq \phi \leq \phi_f$.

neprekidno da duvaju u pravcu radiometara da bi se sprečila pojava rose na njima i da bi se brzo osušili posle padavina.

- U instrumentu ne sme da dođe do kondenzacije vodene pare.
- Merno mesto mora da bude bez senki. Ne sme da postoji reflektovanje svetlosti ka instrumentu za bilo koji ugao Sunca u toku cele godine.
- Instrument mora da bude postavljen horizontalno.

Zahtevi specifični za pirheliometar:

- Za kontinualno merenje mora postojati ekvatorijalna montaža ili automatski pratilac Sunca. Pirheliometar mora da bude zaštićen od spoljšnjih uticaja.
- Instrument mora da bude orijentisan u pravcu Sunca, a odstupanje manje od 0.25 stepeni.

Specifični zahtevi za instrumente koji gledaju na dole, uključujući i sve instrumente za merenje neto zračenja:

- Većina piranometara i pirradiometara ima vidno polje od 180°, pa i u slučaju kada su postavljeni na visinu od 1 do 3 metra iznad tla pokrivaju veliku površinu sa koje dolazi zračenje. Iradijansa koju dobija instrument sa donje hemisfere je

$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} R_{\varphi,\theta} \cos\phi \sin\phi d\phi d\theta, \tag{7.9}$$

ϕ je zenitni ugao, tj. ugao između pravca zračenja i normale na horizontalnu ravan u kojoj se nalaze instrumenti ($0 \leq \phi \leq \pi/2$), θ je azimutni ugao ($0 \leq \theta \leq 2\pi$) i $R_{\varphi,\theta}$ je radijansa. Ukoliko je zračenje uniformno u svim pravcima, $R_{\varphi,\theta} = R = \text{const.}$, tada je $E = \pi R$. Neka je f deo ukupnog zračenja E koje instrument postavljen na visini z primi od tla sa kruga poluprečnika R sa centrom ispod instrumenta. Tada je

$$E_f = fE = 2\pi R \int_0^{\phi_f} \cos\phi \sin\phi d\phi = \pi R \sin^2\phi_f, \tag{7.10}$$

Tabela 7.1: Deo, f, ukupnog zračenja sa tla, E, koji dolazi iz kruga poluprečnika R do senzora koji je okrenut na dole na visini od $z = 3$ m.

f	ϕ_f	R (m)
0.90	71.6	9.0
0.95	77.1	13.1
0.98	81.9	21.0
0.99	84.3	29.8

ϕ_f je zenitni ugao koji ograničava prostor iz koga dolazi deo f ukupnog zračenja. Deo zračenja f je

$$f = \frac{E_f}{E} = \frac{\pi R \sin^2 \phi_f}{\pi R} = \sin^2 \phi_f \quad \Rightarrow \quad \phi_f = \arcsin \sqrt{f}. \tag{7.11}$$

Sa slike 7.5 vidimo da je $\mathrm{tg}\,\phi_f = \frac{R}{z}$, tako da je poluprečnik kruga na tlu iz kog do senzora na visini z dolazi deo f od ukupno primljenog zračenja jednak

$$R = z\,\mathrm{tg}\,\phi_f = z\,\mathrm{tg}(\arcsin \sqrt{f}). \tag{7.12}$$

Odgovarajuće vrednosti poluprečnika R za različite vrednosti f za senzor koji se nalazi na visini $z = 3$ m, prikazane su u tabeli 7.1.

7.4 Merenje trajanja sijanja Sunca

Trajanje sijanja Sunca se, prema WMO (2003), definiše kao vreme u toku nekog perioda u kome je vrednost iradijanse direktnog zračenja Sunca veća od 120 Wm^{-2}. Trajanje sijanja Sunca se izražava u jedinicama vremena. Za klimatološke potrebe koriste se izvedene relativne jedinice, sati po danu ili relativne jedinice date kao količnik trajanja sijanja Sunca i maksimalno mogućeg trajanja sijanja, date u procentima.

Trajanje sijanja Sunca se može meriti različitim metodima:

- Pirheliometrijski metod se zasniva na detekciji praga direktnog sunčevog zračenja od 120 Wm^{-2}. Beleže se vremena događaja prelaska praga intenziteta zračenja. Za merenje se koristi pirheliometar povezan sa elektronskim ili računarskim uređajem za detektovanje praga zračenja i časovnikom.

- Piranometrijski metod koristi merenje globalnog i difuznog sunčevog zračenja piranometrom za određivanje praga direktnog sunčevog zračenja. Nekada se za grubu procenu trajanja sijanja Sunca koriste merenja srednje desetominutne vrednosti globalnog Sunčevog zračenja i minimalne i maksimalne vrednosti u toku tog perioda.

- Metod gorenja. Direktno sunčevo zračenje se fokusira u tačku na kojoj se nalazi kartonska traka. Ako je intenzitet zračenja veći od određenog praga,

na traci ostaje trag gorenja. Dužina trajanja sijanja Sunca je proporcionalna dužini traga gorenja na traci. Instrumenti ovog tipa se nazivaju ***heliografi***. Najčešće je korišćen Kembel-Stoksov heliograf sa staklenom kuglom.

- Metod kontrasta se zasniva na razlikovanju intenziteta zračenja merenog senzorima sa različitom orijentacijom u odnosu na Sunce. Razlika izlaznog signala se može dovesti u vezu sa preporučenim pragom intenziteta direktnog sunčevog zračenja.

- Metod skeniranja se zasniva na poređenju razlike intenziteta zračenja, koji se dobijaju od kontinuarno skeniranih malih oblasti neba, sa preporučenim pragom od 120 Wm^{-2}. Instrument se sastoji od senzora za merenje zračenja i uređaja za skeniranje neba (npr. rotirajućim ogledalom), kao i elektronike kojom se detektuje razlika i računa vreme osunčavanja.

7.4.0.5 Piranometarski metod

Merenje trajanja sijanja Sunca piranometrom se zasniva na postojanju relacije između direktnog sunčevog zračenja, I, i globalnog, G, i difuznog, D, sunčevog zračenja

$$I\cos\phi = G - D, \tag{7.13}$$

ϕ je zenitni ugao Sunca. Da bi jednačina (7.13) bila potpuno primenljiva prostorni ugao koji zaklanja senilo piranometra treba da bude isti kao prostorni ugao iz kojeg dolazi zračenje do pirheliometra. Takođe, spektralne karakteristike i koeficijenti inercije pirheliometra treba da budu što je moguće sličnije. Ako ne postoji pirheliometar, a postoje piranometarska merenja, kriterijum WMO za trajanje sijanja Sunca se u skladu sa jednačinom (7.13) može izraziti kao

$$\frac{G-D}{\cos\phi} > 120\ \mathrm{Wm}^{-2}. \tag{7.14}$$

7.4.0.6 Kembel-Stoksov heliograf

Kembel-Stoksov heliograf, prikazan na slici 7.6, sastoji se od staklene kugle, metalnog sfernog segmenta koncentričnog sa staklenom kuglom i metalnog postolja sa držačima kugle i trake. Staklena kugla je bezbojna ili vrlo svetla, prečnika 10 cm i žižne daljine od 75 mm. Sferni segment, na kome se montira kartonska traka, ima poluprečnik krivine od 73 mm. Staklena kugla fokusira sunčeve zrake koji padnu na nju, tako da oni progorevaju kartonsku traku, postavljenu iza kugle na metalnom držaču. Pri kretanju Sunca tokom dana, na kartonskoj traci ostaje trag od progorevanja. Na traci postoje časovni i polučasovni podeoci. Traka je plave boje, izrađena od kartona, debljine 0.4 ± 0.05 mm.

Kembel-Stoksov heliograf se postavlja na horizontalnu podlogu, a mesto mora biti izabrano tako da ne postoji bilo kakva prepreka koja bi zaklonila sunčeve zrake u bilo koje doba dana tokom cele godine.

Slika 7.6: Kembel-Stoksov heliograf proizvodnje Lambrecht, laboratorija Instituta za meteorologiju Fizičkog fakulteta u Beogradu.

Greške pri merenju trajanja sijanja Sunca ovim heliografom se javljaju uglavnom zbog promena karakteristika trake pri promeni temperature i vlažnosti. U jutarnjim časovima često se javljaju greške koje su posledica taloženja rose ili slane na traci.

Glava 8

Merenje padavina

Zbog znatne prostorne promenljivosti padavine bi trebalo meriti iznad oblasti velike površine. Dobra pokrivenost takvih oblasti se može postići upotrebom većeg broja rasutih mernih instrumenata ili korišćenjem daljinskih senzora sa velikom površinom merenja, kao što je radar.

8.1 Definicije

Intenzitet padavina M_w ($\mathrm{kgm^{-2}s^{-1}}$) je fluks mase vode u tečnom ili čvrstom stanju kroz jediničnu horizontalnu površinu u jedinici vremena. Kako se gustina vode ne menja mnogo sa promenom temperature, smatraćemo je konstantnom. U tom slučaju ***zapreminski intenzitet padavina*** je $R = \frac{M_w}{\rho_w}$ u jedinicama $\mathrm{ms^{-1}}$, ili u mnogo korisnijim jedinicama $\mathrm{mmh^{-1}}$ ili $\mathrm{mmdan^{-1}}$. Intenzitet padavina se može definisati i kao dubina vode kojom bi bila pokrivena horizontalna površina u jedinici vremena ako ne bi bilo oticanja, isparavanja ili proceđivanja vode.

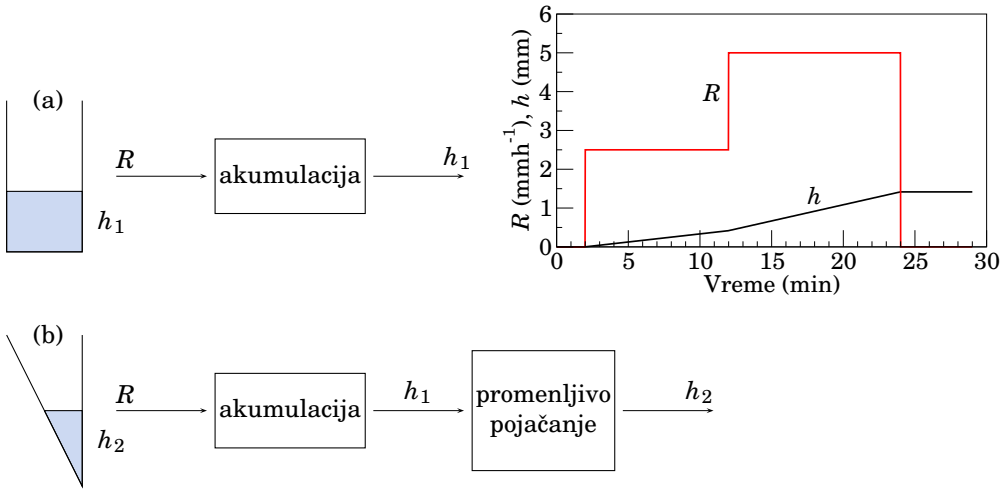
8.2 Metodi merenja

Padavine se mogu meriti tehnikom tačkastih merenja, koja uključuje merenje prikupljenih uzoraka kiše ili neke druge osobine padavina, kao što su njeni optički efekti.

Druga opšta tehnika je merenje padavina na daljinu (***daljinska merenja***), uglavnom radarom i koristi se za procenu padavina iznad velikih oblasti.

8.2.1 Tačkasta merenja

Kišomer bi mogao da bude jednostavan otvoreni sud na tlu koji prikuplja kišu, sneg ili grad. Međutim, to ne bi bio praktičan instrument za procenu količine padavina, imajući u vidu potrebu za izbegavanjem efekata vetra, povećanjem preciznosti i rezolucije i reprezentativnošću merenja.



Slika 8.1: Šematski prikaz jednostavnog akumulacionog kišomera.

8.2.1.1 Akumulacioni kišomeri

Akumulacioni kišomeri prikupljaju i zadržavaju padavine, obično u tečnom obliku, do vremena pražnjenja koje se može izvršiti ručno ili automatski. Pored toga, neki kišomeri mogu automatski da beleže rezultate merenja. Ukoliko ne mogu, beleženje se vrši ručno prilikom periodičnog pražnjenja.

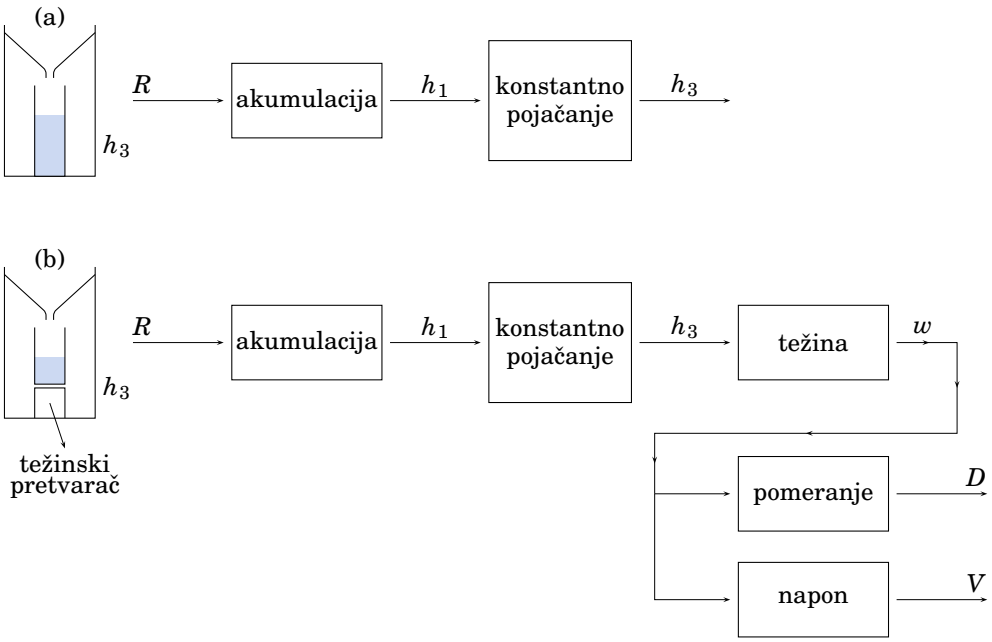
Najjednostavniji akumulacioni kišomer prikazan je na slici 8.1(a). Merena veličina je intenzitet padavina R, a izlazni signal je dubina vode u kišomeru, h_1 u mm

$$h_1(t) = \int_0^t R(t)dt. \tag{8.1}$$

Na slici je intenzitet padavina bio jednak nuli do drugog minuta, zatim je od drugog do 12-tog minuta bio konstantan i jednak 2.5 mmh^{-1}, od 12-tog do 24-tog minuta takođe konstantan 5 mmh^{-1} i posle toga ponovo jednak nuli. Dubina vode u kišomeru raste od nula do 0.42 mm u 12-om minutu, a zatim raste brže i u 24-tom minutu iznosi 1.42 mm. Kada se R vrati na nulu, h se ne menja, osim zbog eventualnog isparavanja. Dubinu vode bi trebalo meriti u pravilnim intervalima budući da se intenzitet padavina procenjuje diferenciranjem funkcije $h_1(t)$

$$R_1 = \frac{dh_1(t)}{dt} \approx \frac{h_1(t+\Delta t) - h_1(t)}{\Delta t}. \tag{8.2}$$

Običnim kišomerom je teško izmeriti h_1 sa velikom tačnošću, pa se koriste različiti metodi za povećanje rezolucije. Kod kišomera koji je šematski prikazan na slici 8.1(b), horizontalni poprečni presek je pravougli, jedna stranica je vertikalna a naspramna je pod nekim uglom u odnosu na vertikalu. Mala količina padavina koja padne u ovaj kišomer čini h_2 većim od ekvivalentne h_1, pa se zbog



Slika 8.2: Šematski prikaz drugih tipova akumulacionih kišomera.

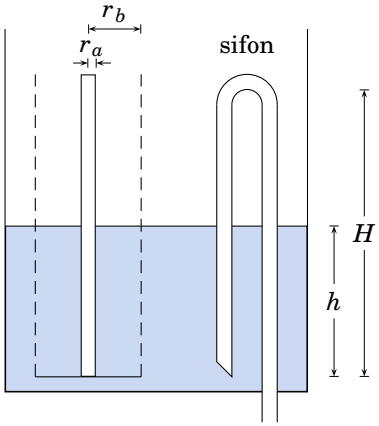
toga lakše očitava. Pojačanje izlaznog signala, $\frac{h_2}{h_1} = \frac{\sqrt{2Hh_1}}{h_1} = \frac{\sqrt{2H}}{\sqrt{h_1}}$, je promenljivo, i smanjuje se kako se kišomer popunjava vodom. H je maksimalna dubina kišomera. Ovaj tip kišomera ima visoku osetljivost za male količine padavina i pored toga ima prilično veliki kapacitet.

Drugi način za popravljanje rezolucije je prikazan na slici 8.2(a). Padavine se prikupljaju kišomerom koji ima veliku prikupljajuću površinu A_c i odvode se u unutrašnji cilindar manjeg prečnika, sa površinom poprečnog preseka A_m. Kako se A_m ne menja sa visinom, faktor pojačanja (h_3/h_1) je konstantan

$$V = A_c h_1 = A_m h_3 \quad \Rightarrow \quad h_3 = \frac{A_c}{A_m} h_1. \tag{8.3}$$

Tipično je $\frac{A_c}{A_m} = 10$. Kod standardnog staničnog kišomera površina kojom se prikupljaju padavine je 200 cm^2, a površina poprečnog preseka menzure A_m = 20 cm^2, pa je tačnost merenja 0.1 mm. Kada se unutrašnji cilindar napuni, voda se preliva u spoljašnji cilindar, pa je kapacitet kišomera veoma veliki. Kao i prethodni i ovaj kišomer se mora prazniti ručno, obično jedanput dnevno.

Izlazni signal kišomera se može beležiti automatski ukoliko postoji pretvarač koji konvertuje izlazni signal h_3 u pomeranje ili napon. Na slici 8.2(b) prikazan je kišomer sa takvim pretvaračem, uređajem koji meri težinu unutrašnjeg cilindra i vode u njemu. U originalnom obliku ovog kišomera, težina se preko opruga i poluga konvertuje u pomeranje pera koje beleži trag na papirnoj traci omotanoj oko rotirajućeg doboša. U modernijem obliku pomeranje se konvertuje u električni napon, koji može da se digitalizuje i zapiše. Težina unutrašnjeg cilindra je $w = (m_c + m_w)g = m_c g + A_c \rho_w g h_1$, m_c je masa cilindra, m_w masa vode u njemu,



Slika 8.3: Šematski prikaz kapacitivnog kišomera sa sifonom.

ρ_w je gustina vode i g ubrzanje sile zemljine teže. Intenzitet padavina se može proceniti kao

$$R_1 = \frac{dw}{dt} = \frac{d}{dt}(m_c g + A_c \rho_w g h_1) = A_c \rho_w g \frac{dh_1}{dt},$$

tako da težina unutrašnjeg cilindra ne utiče na procenu intenziteta padavina.

Postoje i akumulacioni kišomeri koji se mogu prazniti automatski. To su ***pritisni*** kišomer, kišomer ***sa sifonom*** i kišomer ***u obliku klackalice***.

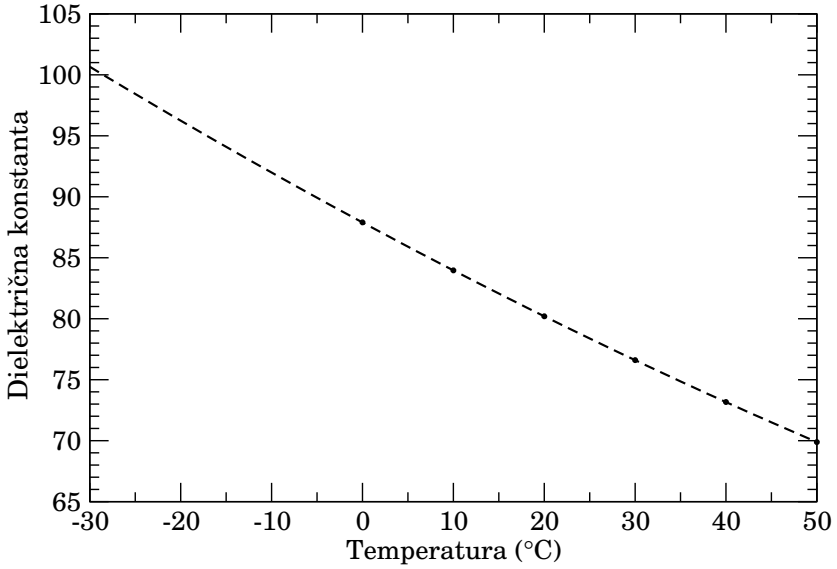
8.2.1.1.1 Pritisni kišomer. Dubina vode u ovom kišomeru, kao što je kišomer šematski prikazan na slici 8.1(a), može da se meri diferencijalnim senzorom za pritisak. Ovaj senzor je povezan preko cevi sa dnom kišomera i meri razliku između pritiska na dnu kišomera i atmosferskog pritiska. Izmerena razlika može da se pretvori u električni napon. U ovaj kišomer može da se ugradi pumpa čiji rad kontroliše mikroprocesor. Kada mikroprocesor detektuje uslov da je kišomer pun, aktivira pumpu i kišomer se isprazni. Ako je temperatura ispod određenog praga, pumpa u kišomer može da ubaci određenu količinu antifriza koji će da spreči zamrzavanje vode.

PRIMER 8.1 *Neka diferencijalni senzor za merenje pritiska u kišomeru ima merni opseg od 0 do* 2000 Pa *i neka je izlazni signal napon koji je proporcionalan pritisku. Pretpostavimo da je greška merenja senzora za pritisak* 2 Pa*. Maksimalna dubina vode u ovom kišomeru može da bude*

$$h_{max} = \frac{p}{\rho_w g} = \frac{2000 \text{ Pa}}{1000 \text{ kgm}^{-3} 9.81 \text{ ms}^{-2}} \approx 0.2 \text{ m}.$$

Ako je greška merenja senzora za pritisak 2 Pa*, onda je greška merenja dubine vode* $\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho_w g} = \frac{2}{1000 \cdot 9.81} = 0.2$ mm*. Ako je aneroidni senzor osetljiv na promenu temperature, što je obično slučaj, izlazni signal će u odsustvu padavina imati male dnevne oscilacije.*

8.2.1.1.2 Kišomer sa sifonom. Ovaj tip kišomera se prazni pomoću sifonskog efekta. Na slici 8.3 šematski je prikazan kišomer sa sifonom kod koga se



Slika 8.4: Dielektrična konstanta vode u funkciji temperature. Tačkama su predstavljeni podaci iz Lide (2007). Isprekidanom linijom je prikazana funkcija $\kappa = 87.895 - 0.401 \cdot t + 0.00081607 \cdot t^2$, dobijena kvadratnom ekstrapolacijom podataka.

nivo vode meri kapacitivnim senzorom. Kapacitivni senzor se sastoji od dva vertikalna koaksijalna cilindra obložena izolatorom. Spoljašnji cilindar je perforiran i voda može da ulazi u prostor između dva cilindra. Spoljašni i unutrašnji cilindar čine kondenzator čiji je dielektrik vazduh kada je kišomer prazan ili voda u slučaju kada je kišomer napunjen vodom. Kapacitet praznog kondenzatora je

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o H}{\ln \frac{r_b}{r_a}} \tag{8.4}$$

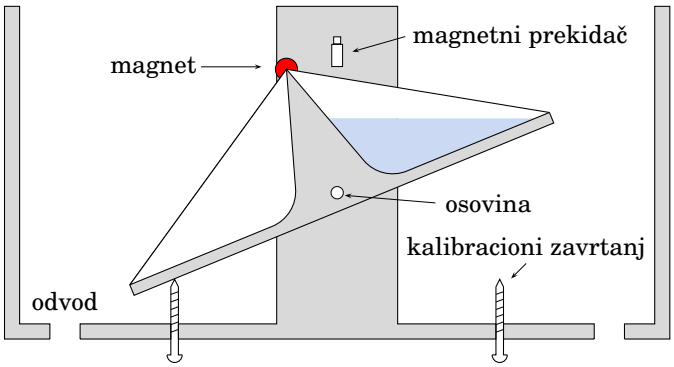
$\epsilon_o = 8.854187817620 \times 10^{-12}$ Fm^{-1} je dielektrična konstanta vakuuma, H je visina cilindra i r_a i r_b su poluprečnici unutrašnjeg i spoljašnjeg cilindra. Kada su cilindri delimično napunjeni vodom, nivo vode, h, se može napisati u obliku dela, f, ukupne visine cilindara $h = fH$. Kapacitet delimično napunjenog kondenzatora je

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o H}{\ln \frac{r_b}{r_a}}[1 + f(\kappa - 1)], \tag{8.5}$$

$\kappa = \epsilon_w/\epsilon_o$ je relativna dielektrična konstanta vode i ϵ_w je apsolutna dielektrična konstanta vode. Relativna dielektrična konstanta vode je funkcija temperature i prikazana je na slici 8.4. Ovaj kišomer je opremljen električnim kolom koje konvertuje kapacitet u frekvenciju, i obično, frekvenciju u električni napon u obliku $V = a_o + a_1 h$.

Izlazni signal kapacitivnog kišomera linearno raste sa dubinom vode. Kada se kišomer napuni vodom, sifon se aktivira i automatski ga isprazni.

Kišomer sa sifonom nema pokretnih delova i može da se koristi na brodovima i bovama. Kapacitivni senzor nivoa vode se postavlja u centar kišomera i tako



Slika 8.5: Kišomer sa klackalicom.

sprečava pojava nagiba. Ovaj tip kišomera ne može da registruje padavine za vreme pražnjenja vode kroz sifon, koje obično traje oko 30 sekundi. Kišomer sa sifonom treba da bude izuzetno čist, jer prisustvo prljavštine i masnoća može da utiče na sifonski proces. Na niskim temperaturama kišomer mora da se zagreva da bi se sprečilo zamrzavanje sifonskog mehanizma i kondenzatora.

8.2.1.1.3 Kišomer sa klackalicom. Kod ovog tipa kišomera prikupljena voda se levkom dovodi do dvodelnog suda, koji je prikazan na slici 8.5. Kada se jedna strana suda puni vodom njegovo težište se pomera na tu stranu. Kada se centar mase nađe van tačke oslonca, sud se iskreće i prazni, a istovremeno se otvor drugog dela postavlja ispod levka. Zapremina jednog dela posude je V_b. Ako je prikupljajuća površina kišomera A_c, promena visine padavina pri svakom otklonu je

$$\Delta h = \frac{V_b}{A_c}.$$

U zavisnosti od dizajna kišomera Δh može imati različite vrednosti, 0.1 mm, 0.2 mm ili neku drugu. Pri svakom otklonu zatvara se magnetni ili živin prekidač. Neobrađeni izlaz ovog kišomera je broj otklona klackalice, odnosno broj zatvaranja magnetnog prekidača, kao što je prikazano na donjem grafiku slike 8.6.

Vreme T_b za koje se napuni jedna strana posude je određeno izrazom

$$V_b = A_c \int_0^{T_b} R(t)dt. \tag{8.6}$$

Ako je intenzitet padavina konstantan, tada je

$$V_b = A_c R T_b \quad \Rightarrow \quad T_b = \frac{V_b}{A_c R} = \frac{\Delta h}{R}. \tag{8.7}$$

Frekvencija zatvaranja kontakta prekidača,

$$f_c = \frac{1}{T_b} = \frac{R}{\Delta h} = \frac{A_c R}{V_b},$$

proporcionalna je intenzitetu padavina. Pošto se ona kontinualno menja sa promenom intenziteta padavina, možemo da kažemo da je izlazni signal kišomera sa klackalicom analogni signal. Ovaj kišomer se može jednostavno automatizovati. Za procenu intenziteta padavina potrebno je prebrojati događaje zatvaranja kontakta u toku određenog perioda i pomnožiti taj broj u jedinici vremena sa Δh. Brojanje događaja zatvaranja kontakta prekidača u pravilnim intervalima vremena je oblik konverzije analognog signala u digitalni.

PRIMER 8.2 *Neka intenzitet padavina raste sa vremenom, kao što je prikazano na vrhu slike 8.6. Brzina kojom se pune leva i desna strana posude kišomera se zbog toga povećava. Kada se jedna strana napuni, posuda napravi otklon i napravi se jedno zatvaranje prekidača. Mikroprocesor registruje broj zatvaranja prekidača u toku nekog perioda vremena. Neka je vremenski period* 300 s *i* $\Delta h = 0.2$ mm*. Tada će, ako postoje dva zatvaranja prekidača u petominutnom periodu, procenjeni intenzitet padavina biti*

$$R = \frac{2\Delta h}{\Delta t} = \frac{0.4 \text{ mm}}{300 \text{ s}} = \frac{0.4 \text{ mm}}{0.0833 \text{ h}} = 4.8 \text{ mmh}^{-1}. \tag{8.8}$$

Procena intenziteta padavina je diskretizovana po vremenu i po vrednosti. Vremenska diskretizovanost potiče od intervala vremena u kojem su brojani događaji zatvaranja prekidača, pet minuta u ovom slučaju. Diskretizacija po vrednosti potiče od fiksne vrednosti zapremine posude i korišćenog intervala vremena.

PRIMER 8.3 *Neka pedeset kišnih kapi prečnika* $D_r = 1$ mm *svake sekunde upadne u kišomer sa klackalicom sa otvorom prečnika* $D = 15.96$ cm*. Intenzitet padavina je*

$$R = \frac{NV_r}{A_c \Delta t},$$

N je broj kapi u jedinici vremena, V_r *je zapremina jedne kapi i* A_c *je površina otvora kišomera. Zamenom vrednosti dobijamo*

$$R = \frac{N\frac{4}{3}(\frac{D_r}{2})^3\pi}{(\frac{D}{2})^2\pi\Delta t} = \frac{50 \text{ s}^{-1}\frac{\pi}{6}(10^{-3} \text{ m})^3}{\frac{\pi(15.96\times10^{-2} \text{ m})^2}{4}\times 1 \text{ s}} = 1.3\times10^{-6} \text{ ms}^{-1} = 4.7 \text{ mmh}^{-1}.$$

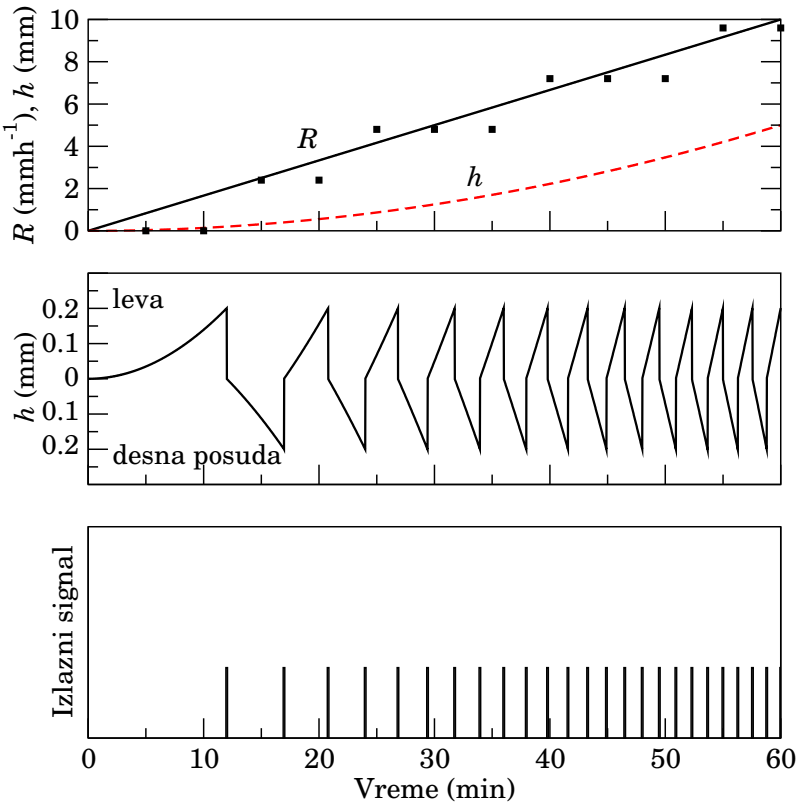
Ako se klackalica okreće na svaka 0.2 mm*, broj otklona u jedinici vremena je*

$$f_c = \frac{R}{\Delta h} = \frac{4.7 \text{ mmh}^{-1}}{0.2 \text{ mm}} = 23.5 \text{ h}^{-1}. \tag{8.9}$$

Ako su padavine veoma slabe, voda koja se akumulira u kišomeru može u velikoj meri da ispari za vreme koje je potrebno da se kišomer napuni. U slučaju jakih padavina kapljice se rasprskavaju van kišomera. Takođe, padavine prikupljene za vreme pražnjenja kišomera se ne mogu registrovati.

8.2.1.2 Merenje snega

Pod merenjem snega se podrazumeva merenje debljine snežnog pokrivača i sadržaja tečne vode u snegu. Ovi podaci su značajni za potrebe hidrologije, poljoprivrede, avio-saobraćaja, putnog transporta itd.



Slika 8.6: Šematski prikaz karakteristika kišomera sa klackalicom pri linearnom povećanju intenziteta padavina. Zapremina pojedinačnog suda kišomera je 0.2 dm^3. Kvadratićima je obeležen intenzitet padavina procenjen na osnovu broja zatvaranja kontakta prekidača u petominutnim intervalima.

8.2.1.2.1 Merenje debljine snežnog pokrivača vrši se pomoću snegomernih letvi i akustičnih senzora. Snegomerne letve mogu biti fiksirane na određenom mestu (stalne) i pokretne. Stalna snegomerna letva se fiksira na pogodnom mestu, obično van meteorološkog kruga. To je drvena letva širine 6 cm, debljine 2.5 cm i dužine od 1 m do 3 m. Na letvi su ucrtani pravougaoni centimetarski podeoci širine 3 cm. Svako neparno polje je crvene boje. Prvih 10 podeoka je ubeleženo na levoj strani letve, drugih 10 na desnoj i tako redom do vrha letve. Mesto na kome se vrši merenje debljine snežnog pokrivača treba da zadovoljava sledeće uslove:

- da je približno veličine 20 m × 20 m;
- da je ravno ili da odgovara nagibu terena na kome se nalazi stanica;
- da nije u senci;
- da nije izloženo vetrovima i
- da je zatravljeno.

Na takvom mestu se postavljaju tri stalna snegomera, tako da se nalaze u temenima jednakostraničnog trougla, sa stranicom dužine najmanje 10 m.

Visina snežnog pokrivača se može meriti i pokretnom snegomernom letvom. Ona se pravi od drveta, širine 4 cm, debljine 2 cm i dužine od 1 m do 3 m, zavisno od moguće visine snega u mestu merenja. Ovaj snegomer ima centimetarsku podelu. Svaki peti i deseti centimetar je obeležen linijom po celoj širini letve, ostali su obeleženi linijom do polovine širine letve. Donja ivica letve je zaoštrena u obliku klina i okovana limom u dužini od 4 cm.

U nepristupačnim i oblastima sa dubokim snegom merenje visine snežnog pokrivača se vrši pomoću graduisanih stubova postavljenih na reprezentativnim mestima. Njihovo očitavanje može da se vrši sa daljine uz pomoć durbina i teleskopa ili iz aviona.

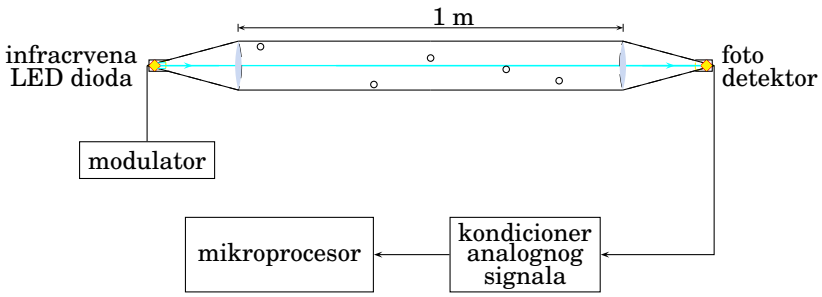
Akustični senzor za merenje visine snežnog pokrivača se postavlja na 10 m iznad tla. On emituje prema tlu ultrazvučne impulse i meri vreme koje protekne do prijema reflektovanog signala. Kako brzina zvuka u vazduhu zavisi od temperature vazduha, potrebno je meriti i nju. Merni opseg senzora je od oko 0.1 m do oko 10 m, a tačnost oko 1 cm (npr. Vaisala IRU-9429 ima opseg od 15 cm do 10.67 m, a tačnost $\pm 0.25\%$ detektovanog opsega).

Visina novog snega, napadalog u periodu od prethodnog merenja, meri se pokretnim snegomerom. U tu svrhu se u blizini mesta na kome se meri visina snežnog pokrivača u sneg utisne bela daska veličine 50 cm $\times$ 50 cm. Gornja ivica daske treba da bude nešto ispod nivoa okolnog snega. Visina novonapadalog snega se meri u odnosu na površinu daske.

8.2.1.2.2 Sadržaj tečne vode u snegu se može meriti prikupljanjem snega kroz otvor određene površine i njegovim topljenjem, uzimanjem uzorka snega i merenjem njegove zapremine i mase, merenjem težine snega iznad snežnog jastuka i merenjem slabljenja gama zračenja pri prolasku kroz snežni pokrivač.

Uzimanje uzorka snega se vrši pomoću cilindričnog suda poznatog poprečnog preseka. Takav sud se zabada vertikalno u sneg do samog tla i očitava visina snega u njemu. Na osnovu očitane visine i površine poprečnog preseka cilindra izračunava se zapremina snega. Uzorak snega se vadi i meri njegova masa ili se topi i meri zapremina dobijene vode. Iz poznate mase i zapremine računa se gustina snega.

Merenje gustine snega pomoću radioaktivnih izotopa zasniva se na slabljenju gama zračenja pri prolasku kroz sloj snega. Slabljenje zračenja je funkcija početne energije zračenja kao i gustine i debljine tog sloja. Potreban je snažan izvor gama zračenja. Za ovu namenu se često koristi radioaktivni izotop kobalta kobalt-60 zbog visoke energije gama zračenja i dugog vremena poluraspada (5.27 godina). Izvor zračenja može da se postavi u tlo na određenoj dubini tako da gama zraci prolaze ne samo kroz sloj snega već i kroz sloj zemlje. Na taj način je, u vreme topljenja snega, moguće dobiti podatke o količini vode koja ulazi u tlo ili teče na površini. Senzori sa radioaktivnim izotopima su složeni i skupi i zahtevaju primenu odgovarajućih sigurnosnih mera. I pored ovih ograničenja, senzori sa radioaktivnim izotopima su pogodni za kontinuarno merenje, posebno u nepristupačnim oblastima.



Slika 8.7: Merač unapred rasute svetlosti.

Snežni jastuk je uređaj kojim se meri sadržaj tečne vode u snežnom pokrivaču. To je skoro potpuno zaravnjen „jastuk“ u obliku kvadrata ili kruga prečnika oko 3 m, napunjen nekim gasom ili tečnošću, napravljen od nerastegljivog materijala, plastike ili metala. Instrument se postavlja na tlo i meri težinu snega na osnovu povećanja hidrostatičkog pritiska zbog postojanja snežnog pokrivača. Pritisak u snežnom jastuku je $p = p_a + \rho_s g h$, p_a je atmosferski pritisak i ρ_s i h su gustina i visina snežnog pokrivača. Sadržaj tečne vode u snežnom pokrivaču je $h_w = \frac{p-p_a}{\rho_w g} = \frac{p-p_a}{g}$. Ako se visina snežnog pokrivača istovremeno meri na neki drugi način, recimo ultrazvučnim senzorom, može se izračunati srednja gustina snega $\rho_s = \frac{p-p_a}{gh}$. Iznad snežnog jastuka može da se formira most kompaktnog snega. Tada se težina snega ne bi potpuno prenosila na jastuk i procena sadržaja tečne vode bi bila manja od stvarne. Da bi se smanjila mogućnost pojave ovakve greške prečnik jastuka mora da bude veliki.

8.2.1.3 Optički kišomer

Rad optičkog kišomera se zasniva na optičkom detektovanju prolaska kišnih kapi i pahulja snega kroz snop svetlosti. Šematski prikaz optičkog kišomera je prikazan na slici 8.7. Izvor svetlosti je infracrvena LED dioda. Ona se napaja električnom strujom čiji napon osciluje frekvencijom od oko 50 KHz. Emitovana svetlost se sočivom usmerava kroz sloj atmosfere dužine 1 m i zatim se fokusira ka fotodetektoru. Izlazni signal iz fotodetektora se filtrira i pojačava u bloku ASC (kondicioniranje analognog signala), zatim se digitalizuje i šalje u mikroprocesor. Fotodetektor je zaštićen od direktnog sunčevog zračenja. Okolna svetlost se ne može ukloniti, ali kako je izvor svetlosti modulisan na visokoj frekvenciji, moguće je koristiti visokopropusni filter* za njeno eliminisanje.

Padavinske čestice (kiša, sneg i ostale) pri prolasku kroz snop svetlosti izazivaju jake fluktuacije svetlosti koju prima detektor. Amplituda i frekvencija oscilacija zavise od veličine i brzine padanja kapi i njihovog broja u snopu svetlosti u datom trenutku. Jedna velika kap ima veću površinu i brzinu padanja od male kapi pa će pri prolasku kroz snop svetlosti izazvati intenzivnu visokofrekventnu fluktuaciju. Mala kap prolazi kroz snop mnogo sporije pa će izazvati slabu ni-

*Visokopropusni filter (*eng. high-pass filter (HPF)*) je uređaj koji propušta visoke frekvencije i prigušuje (smanjuje amplitude) frekvencije koje su manje od granične.

skofrekventnu oscilaciju. Kada u snopu postoji više kapi, svaka od njih izaziva fluktuaciju svetlosti pri ulasku i izlasku iz snopa. Frekvencija oscilacija je funkcija zapremine kapi i njihovog broja u snopu. Takođe, proizvod broja kapi koje prođu kroz snop u jedinici vremena i zapremine kapi proporcionalan je intenzitetu padavina, pa se intenzitet padavina može dovesti u vezu sa frekvencijom oscilacija primljenog signala.

Optički kišomer računa spektralnu varijansu oscilacija u dva talasna opsega: od 1 kHz do 4 kHz i od 25 Hz do 250 Hz. Intenzitet fluktuacija u prvom opsegu je proporcionalan intenzitetu padavina kiše. Količnik snage signala u prvom i drugom opsegu se koristi za razlikovanje kišnih padavina od padavina snega. Ovaj količnik može da se koristi za kompenzaciju slabljenja snage signala izazvanog promenama izvora svetlosti, prljanjem sočiva itd. Pahulje snega padaju mnogo sporije od kišnih kapi i zbog toga prouzrokuju niskofrekventne oscilacije.

Optički kišomer može da detektuje pojavu padavina, da odredi vrstu padavina (kiša ili sneg) i da izmeri njihov intenzitet.

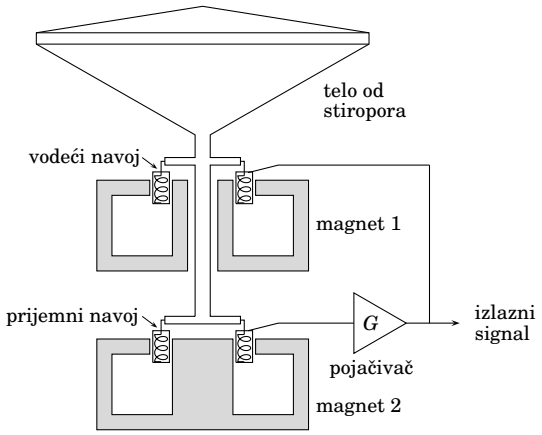
8.2.1.4 Detektori padavina

Detektori padavina, drukčije nazvani ***ombroskopi***, beleže pojavu padavina kiše ili snega, bez merenja njihovog intenziteta. Njihov senzor je u obliku pločice koja ima površinu između 10 cm^2 i 50 cm^2 i iskošena je u odnosu na horizontalu da bi se omogućilo oticanje vode. Senzor detektuje prisustvo vode merenjem promene električnog otpora ili kapaciteta između umetnutih elektroda, koji se menjaju zbog prisustva vode. Pločica se zagreva ako je temperatura ispod $5°C$, da bi detektovala pojavu snega. Takođe, zagreva se kada postoji voda na njoj da bi se osušila ubrzo posle prestanka padavina. Zagrevanje sprečava da se magla, rosa ili slana interpretiraju kao padavine. Ombroskopi se posebno koriste u situacijama gde je potrebno znati vreme pojave i trajanje padavina, a gde količina padavina nije značajna.

8.2.1.5 Disdrometar

Disdrometar je instrument koji se koristi za merenje raspodele hidrometeora po veličini i brzine njihovog padanja. Razvijen je polovinom dvadesetog veka za potrebe fizike oblaka. Detektori veličine kapi su razvijeni i za upotrebu na tlu za merenje energije koja se oslobađa pri sudaru pojedine kišne kapi sa horizontalnom površinom. Ovi podaci su značajni za proučavanje erozije tla. Koriste se pri razvijanju metoda merenja padavina i identifikacije padavinskih elemenata pomoću meteoroloških radara. Pre pojave električnih disdrometara, korišćeni su različiti manuelni metodi za detekciju kapi. Kapi su ostavljale tragove pri padanju na različite površine, npr. na škriljce ili na hemijski tretiran filter papir, ili u posude sa brašnom ili gipsom. Današnji elektronski senzori detektuju sudare kapi na osnovu piezoelektričnog efekta ili magnetne indukcije pri vertikalnom pomeranju površine stiropora pri udaru kapi.

Impaktni disdrometar ima senzor, šematski prikazan na slici 8.8, u obliku konusnog tela izrađenog od stiropora koje prenosi mehanički impuls sudarajuće kapi do dva pokretna navoja (kalema), koji se nalaze u magnetnom polju. Navoji



Slika 8.8: Šematski prikaz senzora impaktnog disdrometra.

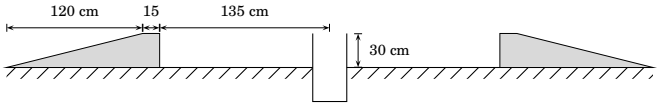
su fiksirani za kućište od stiropora. Pri sudaru kapi kućište sa navojima se pomera u magnetnom polju i u navojima se generiše električni napon. Ovaj napon se pojačava i prenosi do vodećeg kalema u kome se generiše sila koja deluje u suprotnom smeru. Zbog toga je pomeranje izazvano udarom kapi veoma malo i za kratko vreme sistem se vraća u ravnotežni položaj i spreman je za detektovanje sledećeg sudara. Amplituda sudara na izlazu iz pojačivača je mera veličine kapi koja je izaziva.

Druga tehnika se zasniva na merenju malih promena kapaciteta pri prolazu kapi između elektroda kondenzatora. Ovaj tip senzora detektuje promene kapaciteta pri svakom dodiru i razlivanju kapi po staklenoj površini. Zbog toga se vrši promena frekvencije oscilatornog kola. Svaka prispela kap se detektuje, a voda koja ostane na površini nakon razlivanja predstavlja stalnu komponentu signala i ignoriše se.

8.2.1.6 Izlaganje

Turbulentni tok prouzrokovan samim kišomerom skreće male kišne kapi i pahulje snega van kišomera. Zbog toga se smanjuje zahvat kišomera. Eksperimentalno je potvrđeno da je to smanjenje oko 20% pri brzini vetra između 5 ms^{-1} i 10 ms^{-1}. Idealno mesto za postavljanje kišomera bi trebalo da bude bez prepreka koje stvaraju velike turbulentne vrtloge i zakrivljuju strujanje i sa slabim vetrom koji bi omogućio da kiša i sneg padaju vertikalno. Ove uslove je jednostavno ispuniti za velike kišne kapi, ali skoro nemoguće za sitne kišne kapi i sneg. Ako se kišomer nalazi u zavetrini prepreke, padavine mogu biti potcenjene ili precenjene u zavisnosti od prepreke, brzine vetra i veličine padavinskih čestica. Obično se kišomer postavlja tako da se otvor nalazi na visini do jednog metra. U Srbiji se kišomer postavlja tako da se njegova gornja ivica nalazi na visini od tačno jednog metra. Ponekad je potrebno da se oko kišomera postavi poseban zaklon koji stvara turbulenciju i tako minimizira sistematsko odstupanje izazvano vetrom. Kišomer nikada ne treba da se nalazi na zgradi niti u njenoj blizini.

Jedan od načina da se popravi izlaganje standardnog kišomera je da se on



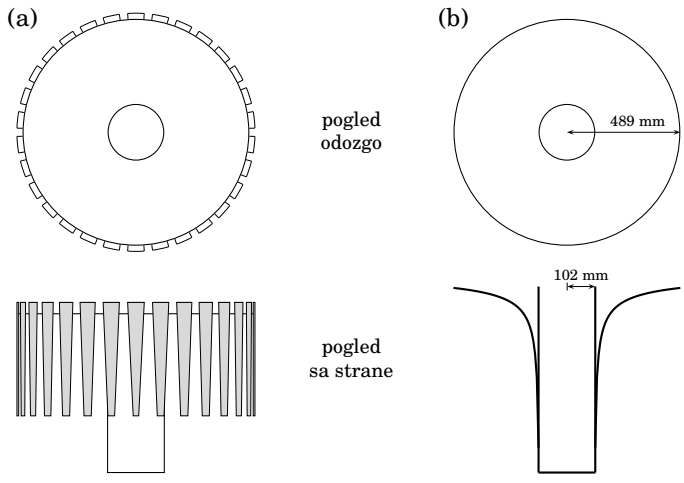
Slika 8.9: Zaklon kišomera u obliku zemljanog rova.

postavi u zemljani rov čija skica je prikazana na slici 8.9. Zemljani rov je skup i glomazan, pa se zbog toga retko koristi. Jeftiniji i jednostavniji zaklon, koji se često koristi je Alterov zaklon prikazan na slici 8.10 (a). Njegovi listići se zakrivljuju u smeru vetra i zauzimaju oblik sličan Nipherovom kišomeru. U oblastima u kojima je veći deo godišnjih padavina u obliku snega pogodnije je koristiti Nipherov kišomer (sl.8.10 (b)). Kišomer Tretjakova je slične konstrukcije kao Alterov, a listići su fiksirani i imaju oblik sličan Nipherovom kišomeru.

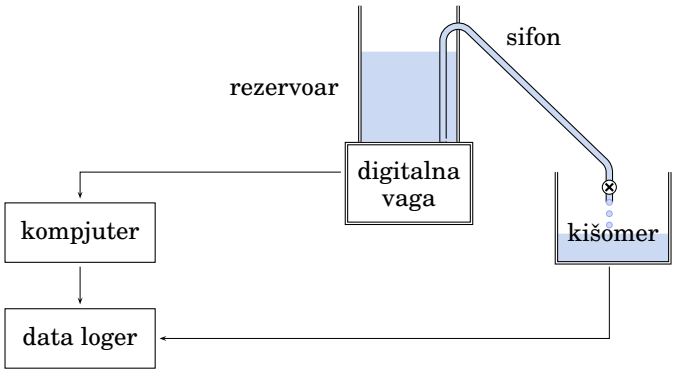
8.2.1.7 Kalibracija

Najjednostavnija kalibracija kišomera sa klackalicom se može uraditi laganim sipanjem izmerene zapremine vode u kišomer i brojanjem otklona klackalice. Kompleksnija kalibracija koristi digitalno merenje mase vode u rezervoaru i šematski je prikazana na slici 8.11. Voda se sifonom odvodi iz rezervoara, a protok se reguliše pomoću ugrađenog ventila. Data loger beleži broj otklona klackalice u određenom intervalu vremena, a računar određuje gubitak mase vode iz rezervoara u jedinici vremena na osnovu merenja mase vode u rezervoaru. Odavde se može naći relacija između intenziteta padavina izmerenog kišomerom i stvarnog intenziteta. Intenzitet padavina se smanjuje sa opadanjem nivoa vode u rezervoaru. Podešavanjem ventila kišomer se može kalibrisati za širok opseg vrednosti intenziteta padavina. Na ovaj način se lako može otkriti nepravilan rad kišomera.

Optički kišomeri se kalibrišu poređenjem sa visoko kvalitetnim kišomerom sa klackalicom.



Slika 8.10: Kišomer sa Alterovim zaklonom, (a) i Nipherov kišomer, (b).



Slika 8.11: Sistem za automatsku kalibraciju kišomera.

8.2.1.8 Izvori grešaka

Izvori grešaka koji su zajednički za sve akumulacione kišomere su:

- *Reprezentativnost*. Da li padavine izmerene kišomerom odgovaraju srednjoj količini padavina u nekoj oblasti? Ako u oblasti površine od 30 km × 30 km = 900 km^2 postoji samo jedan kišomer sa otvorom površine 200 cm^2 = 2×10^{-2}m^2, tada je pokrivenost površine kišomerom $\frac{2\times10^{-2}\ \mathrm{m}^2}{9\times10^{8}\ \mathrm{m}^2} \approx 2 \times 10^{-11}$. Ovo je loše uzorkovanje za bilo koji tip padavina i potpuno neodgovarajuće za olujne nepogode. Ako olujna nepogoda ne pređe iznad kišomera, postojaće veliko potcenjivanje količine padavina. Ukoliko olujna nepogoda pređe iznad kišomera, vrednost izmerena kišomerom će da preceni padavine koje su reprezentativne za datu oblast.

- *Vetar*. Zbog poremećaja strujanja vazduha oko kišomera male kapi skreću sa svoje putanje i padaju van kišomera, što dovodi do potcenjivanja zahvata. Za pahulje snega ovaj efekat je još izraženiji. Vrednost potcenjivanja padavina je funkcija vrste padavina (kiša ili sneg), raspodele kapi po veličini (velike kapi skreću mnogo manje od malih), brzine vetra na nivou otvora kišomera i vrste zaklona kišomera. Kišomer bi trebao da bude na neki način zaklonjen od vetra i postavljen blizu tla gde je brzina vetra manja. U Srbiji kišomer se postavlja tako da je njegov otvor na visini od jednog metra.

- *Kvašenje i isparavanje*. Kada slaba kiša počne da pada u suv kišomer, neka količina vode će da se zadrži na zidovima levka. Zbog toga će biti odložen zabeleženi početak pojave padavina. Ukoliko je kišomer bio vruć neka količina vode će da ispari. Greška izazvana isparavanjem je obično mala, ali odlaganje registrovanja početka padavina može da bude značajna greška u nekim primenama, posebno ako preovlađuju pojave kratkotrajne kiše sa malom količinom padavina.

- *Rasprskavanje kapi*. Kada velike kišne kapi udare u gornji deo levka rasprskavaju se i jedan njihov deo može da bude izbačen iz levka.

- *Začepljavanje levka*. Najuži deo levka može da se zapuši delovima trave ili lišća. Takođe, sneg i led se mogu nakupiti u levku i potpuno ga zatvoriti. Ponekad su kišomeri opremljeni grejačem koji sprečava blokiranje levka snegom ili ledom. Kada se kišomer veštački zagreva povećavaju se gubici zbog isparavanja.

- *Akumulacija rose*. Intenzivna akumulacija rose u kišomeru se može detektovati kao mala količina padavina. Registrovanje padavina, iako ih stvarno nije bilo, predstavlja precenjivanje padavina. Ako akumulacija rose nije dovoljno intenzivna da bi bila registrovana, ona obično ispari u toku dana.

Izvori grešaka specifični za određeni tip kišomera su:

- *Gubici kišomera sa klackalicom pri veoma jakim padavinama*. Kod ove vrste kišomera postoji konačan, mali interval vremena, koji protekne od momenta kada je jedna strana kišomera puna do momenta kada se druga strana postavi u položaj da može da prikuplja padavine. Za to vreme kapi koje upadnu u kišomer ne mogu da budu registrovane. Zbog toga kišomer sa klackalicom potcenjuje vrednosti pri intenzivnim padavinama. Ova greška se može delimično kompenzovati pogodnom kalibracijom.

- *Zaglavljivanje kišomera sa klackalicom*. U slučaju da se klackalica kišomera zaglavi, izlazni signal će biti jednak nuli za sve intenzitete padavina. To se može desiti usled mehaničke neispravnosti, prisustva paučine koja može da bude dovoljno jaka da spreči pomeranje klackalice ili zbog prisustva malih žaba u klackalici.

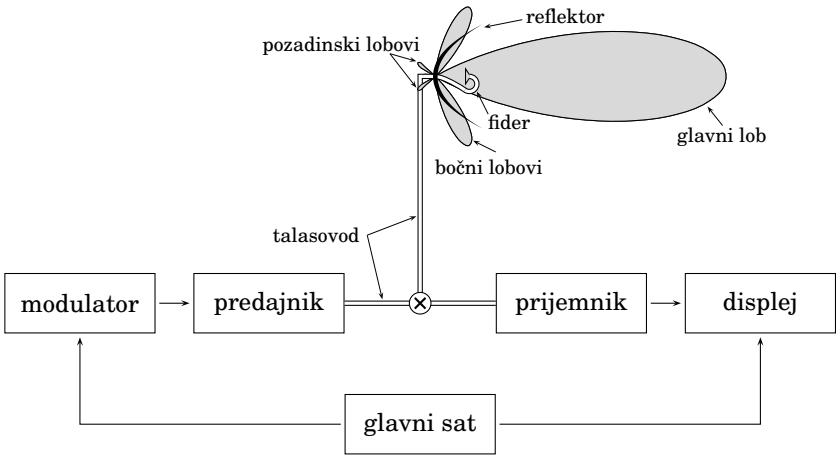
- *Pritisni, težinski i kišomer sa sifonom*. Svi kišomeri koji daju kontinuaran izlazni signal koji je proporcionalan dubini vode u kišomeru mogu biti osetljivi na promenu temperature. Njihov izlazni signal će imati dnevni temperaturni ciklus. Strujanje vazduha oko ovih kišomera može da dovede do kratkotrajnog porasta izlaznog signala što može da bude registrovano kao padavine.

- *Pritisni, težinski i kišomer sa sifonom*. Ovi kišomeri ne mogu da registruju padavine u toku pražnjenja.

- *Pritisni, težinski i kišomer sa sifonom*. Iskusni osmatrači relativno lako prepoznaju promene oblika izlaznog signala koje su izazvane isparavanjem vode, pražnjenjem kišomera, vetrom, promenom temperature, itd. Međutim, automatizacija očitavanja, odnosno pisanje programa koji bi mogao da prepozna navedene signale nije nimalo jednostavan posao.

8.3 Merenje padavina meteorološkim radarom

Radar je elektronski uređaj koji emituje elektromagnetne talase (u radio opsegu) u prostor, prima talase reflektovane od radarske mete i na osnovu primljenog signala određuje karakteristike mete. U meteorologiji se koristi za detektovanje olujnih nepogoda, tornada, za procenu količine i vrste padavina, za



Slika 8.12: Šematski prikaz komponenata radara.

merenje vetra itd. Reč radar je skraćenica od engleskih reči ***Ra***dio ***D***etection ***a***nd ***R***anging i znači otkrivanje i merenje udaljenosti pomoću radio talasa.

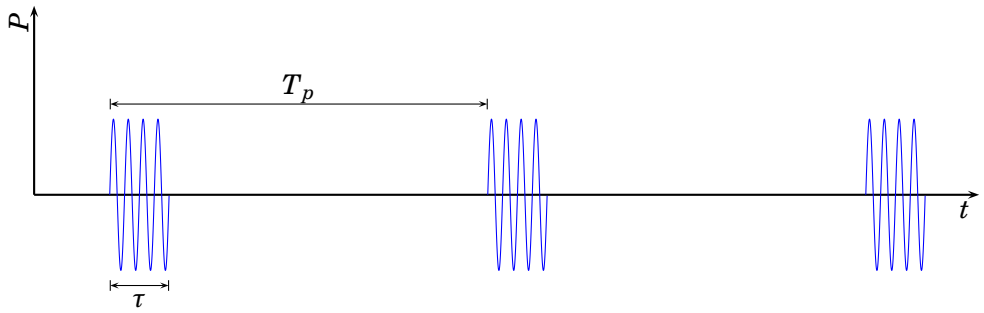
8.3.1 Komponente radara

Osnovne komponente radara, šematski prikazane na slici 8.12, su: predajnik, talasovod, antena, duplekser, prijemnik i displej. Predajnik produkuje kratkotrajne elektromagnetne impulse radio frekvencije visoke snage. Ovi impulsi se specijalnim provodnikom, tzv. talasovodom, prenose do antene, koja ih emituje u prostor u obliku elektromagnetnih talasa. Elektromagnetni talasi se prenose brzinom svetlosti i deo tih talasa se odbija od radarskih ciljeva. Reflektovani radarski signal (eho) prima antena. U toku vremena prijema duplekser propušta slabi eho signal do superosetljivog prijemnika. U prijemniku se vrši pojačanje i demodulacija radiofrekventnog signala i generiše se niskofrekventni signal, koji se obrađuje u procesoru i zatim šalje na displej. Na displeju se korisnicima prikazuje kontinuarna slika koja pokazuje položaj i neke karakteristike radarske mete.

8.3.1.1 Vremenska usklađenost signala

Sinhronizacija vremena između predajnika i prijemnika je neophodna za merenje rastojanja između radara i radarskog cilja. Radarski sistem izrači jedan impuls za vreme τ, to je tzv. vreme emitovanja ili ***širina impulsa***. Nakon emitovanja impulsa radarski sistem osluškuje povratni signal u toku vremena prijema signala i zatim emituje sledeći impuls. Vreme koje protekne od početka emitovanja impulsa do početka emitovanja sledećeg impulsa, T_p, naziva se ***interval ponavljanja impulsa*** (*eng. pulse repetition interval* (PRI)). Oblik signala pulsnog radara prikazan je na slici 8.13. Broj emitovanih impulsa u jedinici vremena naziva se ***frekvencija ponavljanja impulsa***, f_r, (*eng. pulse repetition frequency* (PRF)) i jednaka je

$$f_r = \frac{1}{T_p}.$$



Slika 8.13: Oblik signala pulsnog radara. Vreme emitovanja impulsa ili širina impulsa je τ. Vreme između početka jednog impulsa i početka narednog impulsa je *vreme ponavljanja impulsa* T_p.

8.3.1.2 Merenje rastojanja

Pravolinijsko rastojanje od radara do radarskog cilja je dužina duži koja povezuje radar i radarski cilj. Ovo rastojanje se može izračunati kao

$$r = \frac{ct}{2},$$

c je brzina svetlosti i t je vreme koje protekne od trenutka emitovanja elektromagnetnog impulsa do trenutka detektovanja reflektovanog signala od tog impulsa. Kod pulsnih radara postoji problem kako jednoznačno odrediti rastojanje do radarske mete u slučaju jakog povratnog signala. Prijemnik radara meri vreme između prednjih strana poslednjeg emitovanog impulsa i povratnog impulsa. Postoji mogućnost da eho bude primljen sa vrlo udaljene mete posle emitovanja drugog impulsa. U tom slučaju radar će odrediti pogrešan interval vremena i zbog toga pogrešno rastojanje. U procesu merenja podrazumeva se da je povratni eho povezan sa drugim emitovanim impulsom i daje mnogo manju udaljenost mete. Ovo se naziva neodređenost rastojanja i dešava se u slučaju kada postoje jaki reflektori (radarske mete) na rastojanju većem od $c \cdot T_p$. Vreme ponavljanja impulsa definiše ***maksimalno jednoznačno rastojanje***. Eho signali koji dođu do prijemnika nakon vremena prijema se smeštaju u vreme emitovanja, gde se ne uzimaju u obzir, jer prijemnik tada ne radi, ili u sledeći prijemni interval i izazivaju grešku merenja (nejednoznačni signal). Vrednost maksimalnog jednoznačnog rastojanja nekog radarskog sistema je

$$r_u = c\frac{T_p}{2}.$$

Zbog toga, nakon emitovanja jednog, a pre emitovanja sledećeg impulsa, radar mora da čeka onoliko vremena koliko je potrebno za povratak ehoa od meta na maksimalnom rastojanju od njega.

Kada se prednja strana povratnog impulsa nađe unutar emitujućeg impulsa nemoguće je odrediti vreme povratka, što znači da rastojanje nije moguće izmeriti. ***Minimalna merljiva vrednost*** rastojanja od radara zavisi od širine emitovanog impulsa τ i tzv. vremena prebacivanja dupleksera t_r

$$r_{min} = c\frac{\tau + t_r}{2}.$$

Prijemnik ne može da „sluša“ u toku emitovanja impulsa, jer mora da bude odvojen od transmitera u toku emisije da bi se sprečilo njegovo oštećenje. Vreme prebacivanja dupleksera je vreme koje je potrebno za prekidanje veze sa transmiterom i uspostavljanja funkcionalne veze sa prijemnikom.

Rezolucija rastojanja radara, ΔR, je radarska mera koja opisuje mogućnost da se mete koje se nalaze na bliskom međusobnom rastojanju detektuju kao različiti objekti. Radarski sistem je dizajniran da radi na rastojanju u opsegu od r_{min} do r_u. Ovo rastojanje je podeljeno na M podopsega, tzv. binova, koji imaju širinu ΔR. Broj binova je

$$M = \frac{R_u - R_{min}}{\Delta R}.$$

Mete na međusobnom rastojanju većem ili jednakom od ΔR mogu biti prepoznate kao različite mete. Ako su mete na rastojanju manjem od ΔR ne mogu se prepoznati kao odvojene mete, što je ilustrovano na slici 8.14. Ovde su, radi preglednosti, mete postavljene tako da nisu na istom radijalnom pravcu u odnosu na radar. Rezolucija rastojanja zavisi od širine emitovanog impulsa i u manjoj meri od tipa i veličine meta i osetljivosti prijemnika. Kod dobro dizajniranog radarskog sistema rezolucija rastojanja radara je

$$\Delta R = c\frac{\tau}{2}.$$

Ugaona rezolucija radara je minimalno ugaono razlaganje na kojem dve jednake mete, koje se nalaze na istom rastojanju od radara, mogu biti razlikovane. Ugaona rezolucija radara je određena širinom snopa antene. Što je manja širina snopa, veća je usmerenost antene i bolja ugaona rezolucija. Ugaona rezolucija kao rastojanje između dve mete zavisi od pravolinijskog rastojanja, prema formuli

$$S_A \leq 2R \sin\frac{\theta}{2}.$$

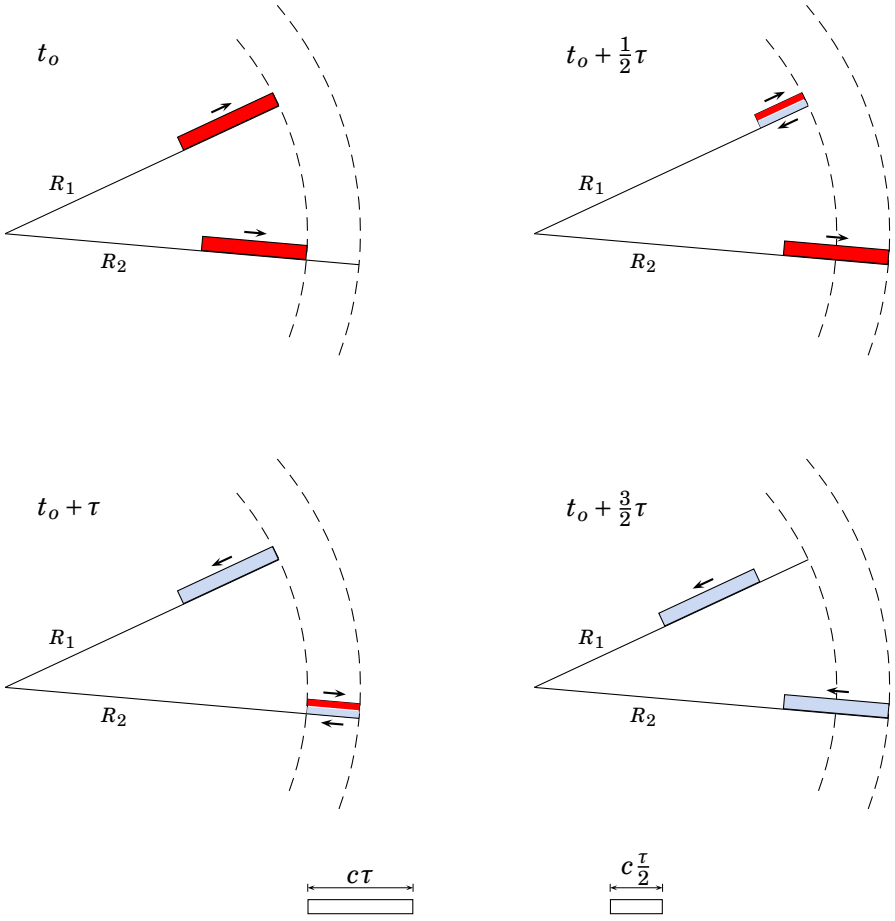
Širina snopa antene je ugao između dva pravca oko ose glavnog loba, na kojima je snaga, P_θ, jednaka polovini maksimalne emitovane snage na osi glavnog loba, P_{θ_o}

$$\frac{P_\theta}{P_{\theta_o}} = \frac{1}{2} \quad \Rightarrow \quad 10\log_{10}\frac{P_\theta}{P_{\theta_o}} = 10\log_{10}\frac{1}{2} \approx -3.$$

Zapreminska rezolucija radara, ΔV, ili rezoluciona ćelija radara je funkcija širine radarskog impulsa i širine snopa antene

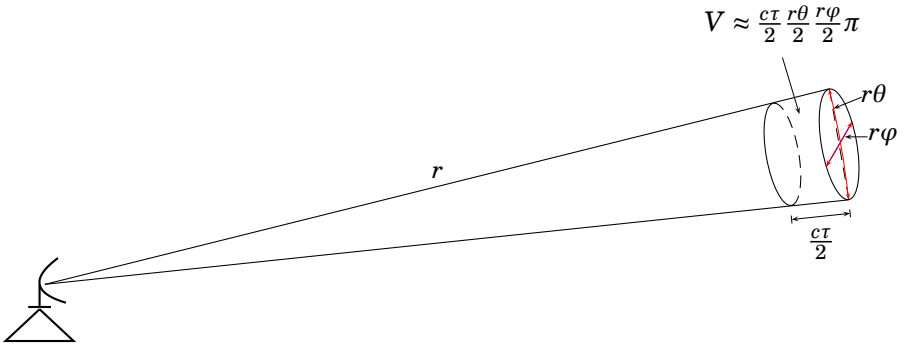
$$\Delta V = \frac{c\tau r^2 \theta\varphi\pi}{8},$$

θ je ugaona širina snopa u vertikalnom pravcu, a φ u horizontalnom. Dve radarske mete koje se nalaze u jednoj rezolucionoj ćeliji se ne mogu razlikovati. Zapreminska rezolucija radara šematski je predstavljena na slici 8.15.



Slika 8.14: Dve mete se mogu raspoznati ako se signali reflektovani od njih ne preklapaju. Rezolucija rastojanja radarskog signala širine impulsa τ je $\Delta R = R_2 - R_1 = c\tau/2$. Prikazani su položaji radarskih impulsa u različitim trenucima vremena, počev od t_o. Radijalna rastojanja meta su R_1 i R_2.

8.3.1.2.1 Predajnik je deo radarskog sistema i predstavlja izvor elektromagnetnog zračenja. Ovaj uređaj generiše elektromagnetne talase visokih frekvencija koji napuštaju radarsku antenu i odlaze u prostor. Postoji nekoliko tipova predajnika koje koriste moderni radari. Svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke. Tri najvažnije vrste predajnika kod radara su: magnetron, klistron i poluprovodnički predajnik. Magnetronski predajnik su konstruisali Britanci 1939. godine i koristili su ga tokom Drugog svetskog rata. Pokazalo se da je to bio jedan od važnijih pronalazaka koji je omogućio da radar radi uspešno, naročito u slučaju posmatranja aviona. Njihove male dimenzije činile su ih idealnim za vazduhoplovnu upotrebu. Magnetronski predajnici su korišćeni za emitovanje različitih radarskih frekvencija i mogu da generišu emitovani signal od preko 250 kW. Klistronski predajnik ima nekoliko prednosti nad magnetronskim. Lakše je kontrolisati oblik talasa emitovanog impulsa. On emituje više energije od magnetronskih (2MW ili više) i njegovi izlazni signali su čistijih frekvencija. Ove kasnije pomenute karakteristike su posebno pogodne za merenje brzine kreta-



Slika 8.15: Šematski prikaz uzoračke zapremine radara. Ugaona širina snopa u vertikalnom pravcu je θ, a u horizontalnom je φ. Ugaona širina snopa je definisana kao ugao, u ravni u kojoj je osa glavnog loba, između dva pravca na kojima je emitovana snaga jednaka polovini snage na osi glavnog loba.

nja detektovanih meta doplerovim radarima. Poluprovodnički predajnici obično imaju manju predajnu snagu. Jedan poluprovodnički predajnik može da preda samo 50 W snage. Međutim, povezivanjem više pojedinačnih predajnika i kontrolom vremena emisije svakog elementa, moguće je postići korisne izlazne snage. Bez obzira koja vrsta predajnika se koristi kod radara, njegov rad se kontorliše elektronskim uređajem koji je nazvan modulator. Svrha modulatora je da uključuje i isključuje predajnik i da proizvede ispravan oblik talasa kod impulsa koji je emitovan. To znači da modulator saopštava predajniku kada da emituje energiju i trajanje emitovanja. Glavni sat kontroliše rad celog radarskog sistema. On određuje koliko će često radar emitovati signal u prostor. Ovaj uređaj može da se koristi za kontrolu i drugih delova radara. Primer za to je sistem displeja i signalnih procesora koji se koriste kod modernih meteoroloških radara. Brzina kojom radar emituje signale zove se brzina ponavljanja impulsa ili učestanost (frekvencija) ponavljanja signala, f_r . Ona predstavlja broj impulsa u sekundi, ili emitovanih ciklusa u sekundi i izražava se u hercima. Tipična frekvencija za različite vrste radara kreće se od 200 Hz do 3000 Hz. Stariji, konvencionalni radari vezani za zemlju, radili su sa frekvencijom koja je imala vrednosti od 150 do 300 Hz. Doplerovi meteorološki radari - koji mogu da odrede brzinu mete koja se kreće od radara ili ka njemu - obično rade na frekvencijama od 700 do 3000 Hz. Meteorološki radari na avionima rade na frekvenciji od 500 do 1500 Hz. Trajanje emitovanja signala može da se izrazi na dva načina. Ako se meri po jedinici vremena, ta veličina se zove trajanje impulsa, τ, a ako se meri po jedinici rastojanja, dužina impulsa, h. Najčešće trajanje impulsa iznosi od 0.1 do 10 μs. Ovo znači da predajnik emituje impuls od 1 μs pri recimo l000 Hz. Ovaj impuls elektromagnetnog zračenja putuje od radarske antene brzinom svetlosti. Ako pogodi neku metu duž ovog puta, deo energije će se reflektovati ka radaru. Ako je signal koji ide od radara dovoljno jak, biće detektovan i prikazan radarskim sistemom. U tabeli 8.1 prikazane su neke karakteristike tipičnih meteoroloških radara.

Tabela 8.1: Karakteristične vrednosti tipičnih meteoroloških radara. KPR označava konvencionalne pulsne radare, koji mere samo radarsku refleksivnost Z.

Tip	KPR	Dopler	KPR	Dopler	mikro dopler
Opseg	C	C	S	S	C
Frekv. (GHz)	5.6	5.6	3.0	2.8	5.5
Tal. dužina (cm)	5.33	5.33	10.0	10.7	5.4
Širina pulsa (μs)	2.0	0.5, 2.0	0.25, 4.0	1.57, 4.5	1.1
PRF (Hz)	250-300	250-1200	200-800	300-1400	235-2000
Preč. antene (m)	3.7	6.2	3.7	8.6	7.6
Širina snopa (°)	1.1	0.6	1.8	1.0	0.5
Pojačanje (dB)	44	48	38.5	45	51
Brz. rot. (rpm)	6	1-6	3	6	5

8.3.1.2.2 Antena je uređaj koji emituje signal u prostor u obliku elektromagnetnog talasa. Radari obično imaju usmerene antene. To su antene koje usmeravaju energiju u određenom pravcu, sa vrlo malo enegrije u ostalim pravcima. Zbog toga se radarom može odrediti pravac na kom se nalazi meta. Sa povećanjem reflektora antene, pri datoj frekvenciji elektromagnetnog signala, smanjuje se širina snopa zračenja i povećava ugaona rezolucija radara. Antena koja emituje jednako zračenje u svim pravcima naziva se izotropna antena. Njeno zračenje se obično upoređuje sa svetlom sveće (Rinehart, 1991). Osim neposredno ispod sveće intenzitet svetlosti je skoro isti u svim pravcima. Zračenje radara je više slično zračenju baterijske lampe. Kod lampi se pomoću reflektora, koji je postavljen iza sijalice, svetlost usmerava u određenom pravcu. Kod radara antena emituje radarski signal ka reflektoru koji usmerava signal od radara. Što je reflektor veći, više se usmerava signal i manja je širina snopa antene. Od oblika reflektora zavisi i oblik dijagrama zračenja antene. Meteorološki radari obično imaju reflektore koji su parabolični u poprečnom preseku i kružni kada se posmatraju sa prednje ili sa zadnje strane. Zbog toga se nazivaju kružno-parabolični reflektori. Oblik dijagrama koji formira kružno-parabolični reflektor je konusan i obično veoma uzak, tipično 1° u širini za glavni lob dijagrama zračenja. Ono što obično zovemo „antenom“ je kombinacija fidera i reflektora (slika 8.12).

Dužina antene mora da bude usklađena sa talasnom dužinom emitovanog zračenja. Za postojanje efikasnog zračenja elektromagnetne energije dužina antene treba da bude reda veličine desetine talasne dužine emitovanog zračenja ili veća (Lathi, 1998). Veličina kružno paraboličnog reflektora se definiše njegovim prečnikom. Širina snopa kod meteoroloških radara je u opsegu od 0.5° do 2.0°. Za snop širine 0.5 i 1.0°, za talasne dužine C opsega prečnik antene je 7.1 i 3.6 m, redom, a za talasne dužine S opsega 14.3 i 7.2 m.

Sledeći parametar koji karakteriše antenu radara je ***pojačanje antene***. Pojačanje antene, G, je količnik snage koju primi određena tačka na osi snopa, tj. tačka gde je maksimalna snaga, i snage koju bi ta ista tačka primila od izotropne antene. Pojačanje je bezdimenzionalna veličina i obično se, zbog velikog raspona

vrednosti, meri u decibelima

$$G(\text{dB}) = 10\log_{10}\frac{p_1}{p_2},$$

p_1 je stvarna snaga izmerena u tački prostora, a p_2 je snaga koja bi bila izmerena na tom mestu da je bio upotrebljen izotropni radijator.

Sledeći važan parametar vezan za antenu je širina snopa. Veliki reflektori daju uzak snop zračenja. Pojačanje antene je funkcija širina snopa (Battan, 1973)

$$G = \frac{\pi^2 k^2}{\theta\phi},$$

θ i ϕ su horizontalna i vertikalna širina snopa antene, redom, a k^2 zavisi od tipa i oblika antene. Za kružne reflektore, $k^2 = 1$. Širine snopa θ i ϕ predstavljaju ugaona rastojanja u horizontalnoj i vertikalnoj ravni, redom, između tačaka u kojima je snaga jednaka polovini maksimalne snage. Za kružne reflektore, horizontalna i vertikalna širina snopa su jednake, pa je

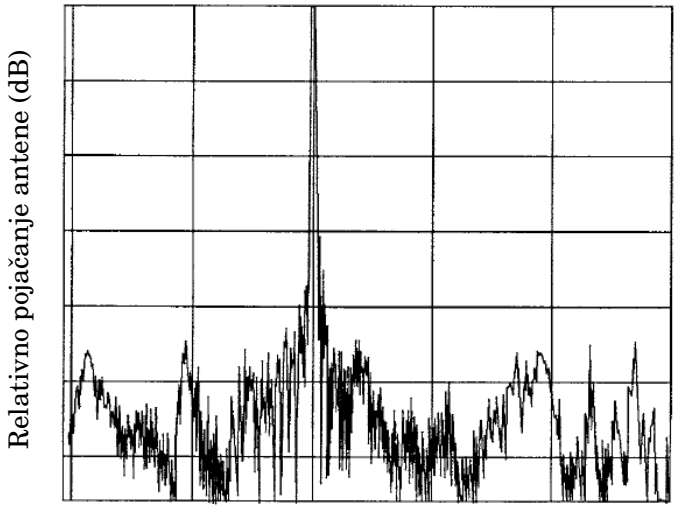
$$G = \frac{\pi^2}{\theta^2},$$

U ovoj jednačini širina snopa antene je data u radijanima. Za antenu koja ima širinu snopa 1°, pojačanje će biti

$$G = \frac{\pi^2}{\left(1^\circ \frac{\pi}{180^\circ}\right)^2} = 32400 = 45.1 \text{ dB}.$$

Idealna antena bi usmerila svu izračenu energiju u jednom zadatom pravcu, i ni u jednom drugom. Međutim, realne antene emituju zračenje koje ima najsvetliju oblast (tzv. glavni lob, ili glavni snop), ali takođe emituju i primaju energiju van glavnog loba u tzv. bočnim lobovima. Bočni lobovi postoje u svim pravcima oko glavnog loba i razlikuju se od pravca do pravca. Zračenje radara, za razlliku od zračenja baterijske lampe, može da ode iza radara i formira pozadinski lob. Na slici 8.16 prikazan je deo dijagrama zračenja antene radara FL2, S-opsega, $\lambda \approx 10$ cm, (Rinehart, 1991). Ovakav oblik je izmeren postavljanjem kalibrisanog signalnog generatora na određeno rastojanje od radara i merenjem snage signala u toku laganog azimutnog skeniranja antene po celom krugu. Na slici se jasno vidi izražen glavni lob koji se dobija kada se antena direktno usmeri u signalni generator. Bočni lobovi, u blizini glavnog loba, su prikazani kao umereno jaki ali uski vrhovi. Sa obe strane na oko 120°, nalaze se oblasti sa jakim bočnim lobovima.

Kompleksnost antenskog snopa najbolje se može videti na trodimenzionalnoj slici. Slika 8.17 prikazuje dijagram zračenja antene radara CP2, X-opsega, $\lambda \approx$ 3.2 cm, (Rinehart, 1991). Kao što se može videti na slici, postoji mnogo bočnih lobova koji okružuju glavni lob. Svaki sledeći pojas bočnih lobova je slabiji po snazi. Prikaz na slici pokriva samo 10° po azimutu i elevaciji, po 5° sa svake strane glavnog loba. Izgled kompletnog dijagrama zračenja antene bio bi još kompleksniji.



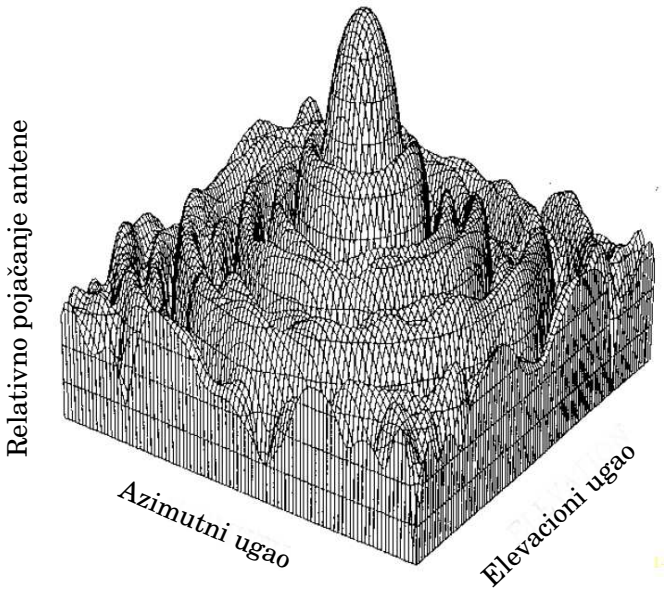
Slika 8.16: Dijagram zračenja antene FL2 radara, S-opsega, $\lambda \approx 10$ cm (Rinehart, 1991).

8.3.1.2.3 Talasovod Klasični provodnici bi mogli da se koriste za prenošenje radarskih signala između predajnika i antene, ali bi imali ekstremne gubitke. Čak i pri nižim frekvencijama koje koristi radio, obični provodnici gube mnogo energije. Radio inženjeri su pronašli bolji način za prenošenje radio frekventnih signala, pomoću specijalnog provodnika koji je dobio ime - koaksijalni kabl. Koaksijalni kablovi su napravljeni od centralnog izolovanog provodnika, oko koga se nalazi sloj zaštitnog provodnika koji je okružen još jednim slojem izolatora.

Na radarskim frekvencijama, čak i ova vrsta kablova ima velike gubitke. Da bi se oni izbegli, pronađena je druga vrsta provodnika koja je potpuno efikasna za prenošenje radarskih signala. Taj provodnik nazvan je talasovod. To je tipično šuplji, pravougaoni, metalni provodnik, čije unutrašnje dimenzije zavise od talasne dužine signala koji se prenosi. Talasovodi se međusobno spajaju slično bakarnim vodoinstalacionim cevima u kući. Dugi delovi talasovoda se međusobno povezuju specijalnim spojnicama radi povezivanja predajnika(prijemnika) i antene. To omogućava da predajnik i prijemnik budu postavljeni na jednom mestu, a antena na drugom, kod konvencionalnih meteoroloških radara obično na vrhu antenskog stuba.

8.3.1.2.4 Duplekser, prikazan na slici 8.12, je specijalni prekidač u radarskom sistemu koji štiti prijemnik od velike energije predajnika. Većina radara emituje snagu od nekoliko hiljada do više od jednog megavata snage. Istovremeno, radari imaju prijemnike koji mogu da detektuju veoma slabe signale, čija je snaga manja od 10^{-10} W. Ukoliko bi mali deo energije emitovane transmiterom otišao u prijemnik došlo bi do njegovog oštećenja.

Za zaštitu prijemnika od ovakve mogućnosti u talasovod između predajnika i prijemnika dodat je automatski prekidač (duplekser). Kada je predajnik uklju-

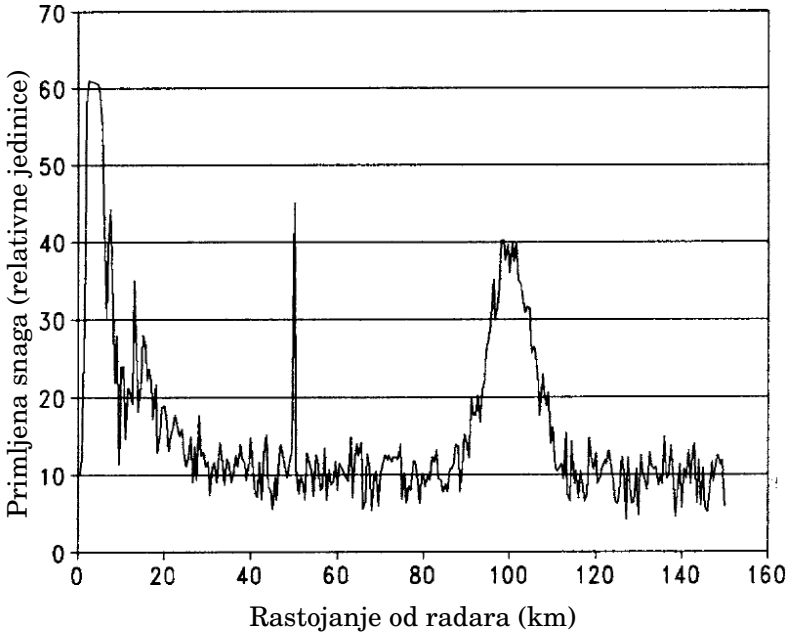


Slika 8.17: Dijagram zračenja antene radara, NCAR CP2, X-opsega, $\lambda \approx 3.2$ cm. Elevacioni i azimutni uglovi su u granicama od 0°, na osi glavnog loba, do ±5° sa svake strane glavnog loba, a interval je 0.1°. Horizontalne konture predstavljaju intervale relativnog pojačanja od 6 dB (Rinehart, 1991).

čen, duplekser usmerava snažan impuls energije od prijemnika do antene. Čim predajnik prestane sa slanjem signala, duplekser menja položaj, tako da je prijemnik sada povezan za antenu dok je predajnik nepovezan. Ako ne bi postojao duplekser ili neki drugi zaštitni uređaj, bilo bi neophodno razdvojiti predajnik i prijemnik na veoma veliko rastojanje koje bi omogućilo zaštitu prijemnika.

8.3.1.2.5 Prijemnik je napravljen da otkrije i pojača vrlo slabe signale primljene preko antene. Radarski prijemnici moraju da budu veoma visokog kvaliteta, zbog toga što su signali koji se primaju obično veoma slabi. Meteorološki radari u većini slučajeva imaju prijemnik super heterodinskog tipa. Kod njih se primljeni signal meša sa referentnim signalom čija je frekvencija različita od frekvencije emitovanog signala. Mešanjem primljenog signala sa referentnim smanjuje se frekvencija signala (najčešće je u opsegu od 30 do 60 MHz), čime se olakšava njegova obrada. Ova frekvencija se zatim pojačava do određene vrednosti koja je pogodna za input displeja i arhiviranje. Kako je frekvencija ovog signala mnogo niža, a rastojanje između prijemnika i procesora (kao i displeja i uređaja za arhiviranje) sasvim kratko, provodnik ne mora da bude talasovod, već se koristi koaksijalni kabl.

8.3.1.2.6 Meteorološki produkti Produkti meteoroloških radara zavise od vrste radara i načina obrade dobijenih signala. Moderni meteorološki radari vrše automatsko skeniranje po zapremini koje se sastoji od niza punih azimutnih rotacija antene na različitim elevacijama. Svi sirovi polarni podaci su smešteni u jedan trodimenzionalni niz, tzv. zapreminsku bazu podataka, koja se može arhi-

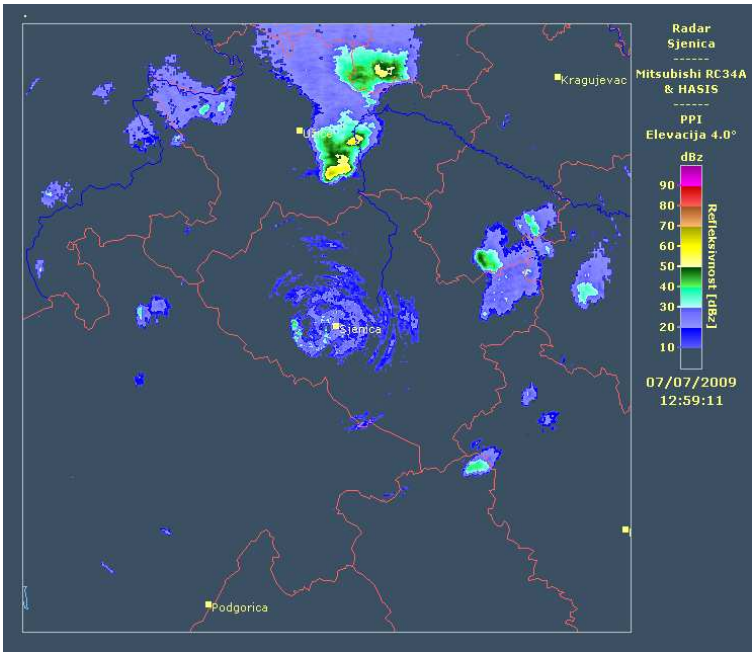


Slika 8.18: Šematski dijagram A-pokazivača. Prikazani su, redom, energija koja iz predajnika curi ka prijemniku, stalni odrazi, šum, izolovana tačkasta meta i udaljeni eho od meteorološke mete (Rinehart, 1991).

virati ili dalje obrađivati. Zavisno od vrste softvera, mogu se generisati različiti produkti koji se mogu grafički prikazati. Veličine koje se prikazuju kod tipičnih doplerovih meteoroloških radara su refleksivnost, intenzitet padavina, radijalna brzina i širina spektra. Svaki piksel na slici predstavlja bojom okarakterisanu vrednost izabrane promenljive.

8.3.1.2.7 Displeji Postoje mnogi načini da se prikažu radarski podaci. Najraniji i najjednostavniji displej za prikazivanje radarskih podataka bio je obični osciloskop, koji je na horizontalnoj osi imao vreme, a na vertikalnoj osi jačinu signala ili intenzitet. Kako se elektromagnetno zračenje prostire brzinom svetlosti, vremenska osa je istovremeno i skala rastojanja. Vertikalna skala može da bude kalibrisana u jedinicama snage. Na slici 8.18 šematski je prikazan amplitudni A-displej. Radarske mete se identifikuju na osnovu vrhova inteziteta na različitoj udaljenosti od radara (radar je na levoj strani x ose). Amplitudni pokazivač ne daje informaciju o tome gde je usmerena radarska antena. Obično želimo da znamo gde se tačno nalazi radarska meta, a ne samo koliko je njeno rastojanje od radara i kolika je snaga radarskog odraza.

Klasični displej radara koji se najčešće koristi za dobijanje informacija o vremenu je horizontalni prikaz ili PPI (*eng. plan position indicator*). On se dobija iz jedne pune rotacije antene na izabranoj elevaciji. Ovaj displej prikazuje radarske podatke u obliku mape, sa radarom u njenom centru. Obično se kao podloga kod ovog displeja koristi topografska karta sa ucrtanim rekama i administrativnim granicama. Daljina se lako određuje ubacivanjem oznaka za udaljenost ili kružnica koje pokazuju rastojanje od radara. Pravac radarske mete je prikazan

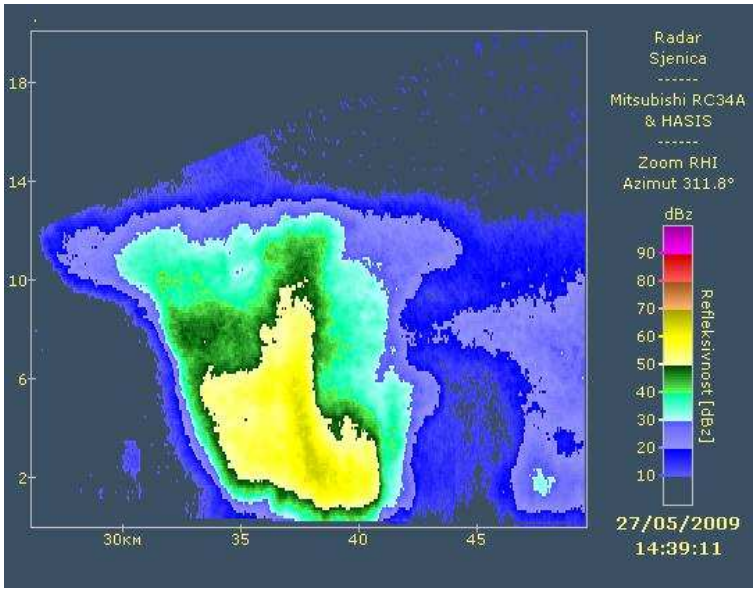


Slika 8.19: PPI prikaz radarske refleksivnosti generisan podacima konvencionalnog pulsnog radara Mitsubitsi RC34A, sa radarskog centra Sjenica, pri elevacionom uglu od $\varphi = 4°$. Intenzitet povratnih odraza meteoroloških meta prikazan je različito obojenim površinama.

pomoću položaja odraza u odnosu na radar. Kod stacionarnih radara displej je orijentisan tako da mu je vrh usmeren ka severu, a desna strana ka istoku. PPI displej konvencionalnog pulsnog radara Mitsubitsi RC34A, sa radarskog centra Sjenica, prikazan je na slici 8.19. Radar se nalazi u centru displeja, a daljina se povećava radijalno od centra. Oblik meteoroloških ciljeva i snaga reflektovanog signala predstavljeni su odgovarajuće obojenim površinama. U blizini radara se nalazi kružna osenčena oblast koja može da bude posledica odraza od nepogode ili je odraz od orografskih prepreka (stalni odraz). Severno od radara nalazi se oblast sa najvećom refleksivnošću, koja potiče od jake olujne nepogode.

Vertikalni pokazivač ili RHI (*eng. range-height indicator*) je takođe klasični radarski displej. Dobija se skeniranjem antene u vertikalnom pravcu, obično od 0 do 90°, pri konstantnom azimutu. Koristan je za detaljni prikaz vertikalne strukture i koristi se za identifikaciju jakih oluja i grada. Kod ovog displeja horizontalna osa je rastojanje od radara, a vertikalna osa je visina iznad radara. Odrazi su predstavljeni na displeju kao obojene oblasti. Često se koriste zumirani RHI displeji, koji prikazuju željenu oblast vertikalnog preseka sa više detalja. Jedan takav RHI prikaz predstavljen je na slici 8.20. Na mnogim vertikalnim pokazivačima vertikalna koordinata je prilično izdužena, da bi se omogućio detaljniji prikaz. Konvektivni oblaci su najčešće aproksimativno sfernog oblika. Prikazani sa vertikalnim uvećanjem od 5 ili 10 puta izgledaju mnogo viši nego što su stvarno.

Pokazivač CAPPI (*eng. constant altitude plan position indicator*) je prikaz horizontalnog poprečnog preseka promenljive na konstantnoj visini. Dobija se



Slika 8.20: Zumirani RHI prikaz radarske refleksivnosti dobijen na osnovu podataka konvencionalnog pulsnog radara Mitsubitsi RC34A, sa radarskog centra Sjenica, pri azimutnom uglu od $\theta = 311°$.

interpolacijom iz zapreminskih podataka. Koristan je pri identifikaciji jakih nepogoda i za određivanje nivoa leta u vazdušnom saobraćaju. Oblasti bez podataka u prikazu CAPPI (blizu radara ili daleko od njega, a odnose se na izabranu visinu) su popunjeni podacima sa viših i nižih nivoa, redom, u drugoj formi prikaza, koji se zove pseudo CAPPI.

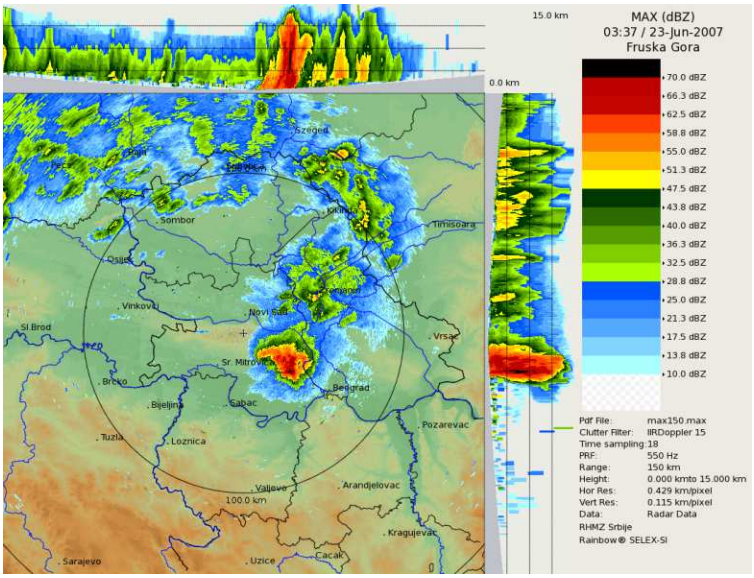
Maksimalni prikaz je ravanski prikaz maksimalne vrednosti veličine iznad svake tačke osmotrene oblasti. Ako je prikaz u horizontalnoj ravni onda su prikazani maksimumi veličine u vetrikalnom pravcu iznad date tačke u ravni. Maksimumi duž x ose su prikazani u vertikalnoj $z - y$ ravni, a maksimumi duž y ose u vertikalnoj $z - x$ ravni. Displej maksimalnih vrednosti radarske refleksivnosti, računat na osnovu podataka dobijenih radarom Gematronik, sa radarskog centra Fruška gora, prikazan je na slici 8.21

Pokazivač vrhova ehoa prikazuje, u ravni, najveću visinu na kojoj se pojavljuje izabrana kontura refleksivnosti, dobijena iz zapreminskih podataka. Indikator je olujnih nepogoda i grada.

Pokazivač VIL (*eng. vertically integrated liquid*) prikazuje, u ravni, po visini integrisanu zapreminu tečne vode. Integracija se može izvršiti po ukupnoj visini ili za jedan određeni sloj atmosfere. Koristan je kao pokazatelj intenziteta jakih oluja.

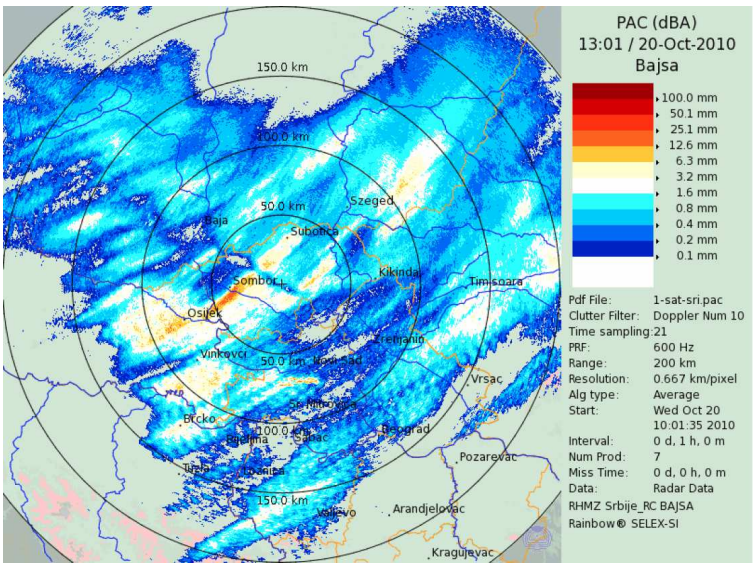
Pored ovih standardnih prikaza, moderni radari daju dodatne produkte za posebne hidrološke i vazduhoplovne namene i potrebe kratkoročne prognoze vremena.

Za hidrološke namene korisni su prikazi akumuliranih padavina, PAC (*eng. precipitation accumulation*), intenziteta padavina na površini, SRI (*eng. surface rain intensity*), ukupne akumulirane padavine u izabranoj oblasti (tipično



Slika 8.21: Prikaz maksimalnih vrednosti radarske refleksivnosti, dobijen na osnovu podataka doplerovog radara Gematronik, sa radarskog centra Fruška gora.

za rečni sliv), RSA (*eng. river subcatchment accumulation*) i intenzitet padavina u funkciji vremena za selektovanu lokaciju u obliku histograma, RIH (*eng. rainfall intensity histogram*). Displej sa prikazanim padavinama, akumuliranim za vreme od jednog sata, dat je na slici 8.22.



Slika 8.22: Prikaz jednočasovnih akumuliranih padavina, dobijen na osnovu podataka doplerovog radara Gematronik, sa radarskog centra Bajša (Nadj i Babić, 2010).

8.3.2 Radarska jednačina

Kada radar emituje impuls energije, ta energija se usmerava u prostor preko antene. Jedna od najjednostavnijih vrsta antena je ona koja emituje energiju jednako u svim pravcima. Ovakva antena zove se izotropna. Snaga emitovana iz izotropnog izvora zračenja se širi od antene brzinom svetlosti, formirajući sferu energije koja se širi u prostoru. Površina koju pokriva jedan talas koji se širi, jednaka je površini koja odgovara površini sfere, $4r^2\pi$, gde je r rastojanje od radara (poluprečnik sfere). Snaga zračenja po jedinici površine, P_s, na rastojanju r od radara, jednaka je

$$P_s = \frac{P_t}{4\pi r^2}, \tag{8.10}$$

P_t je snaga koju emituje radar.

Kada je antena neizotropna, ona formira ili koncentriše energiju u određenom pravcu. Kako se ne menja ukupna snaga koju radar emituje, smanjiće se energija koja će biti emitovana u nekom drugom pravcu. Idealno bi bilo kada bi sva energija odlazila u željenom pravcu, a da apsolutno ni jedan delić te energije ne odlazi u nekom drugom. Na žalost, u stvarnosti, realne antene deo energije šalju u pravcu u kom ne želimo. Jedan deo te energije, odlazi čak i iza radara. Kada se koristi realna antena, količina snage duž centra ose snopa na nekom rastojanju je veća, nego što bi bila kad bi se koristila izotropna. Jedna mera stepena koncentracije snage je pojačanje antene. Matematički, pojačanje se definiše kao

$$G \equiv \frac{\text{snaga po jedinici površine duž ose snopa}}{\text{odgovarajuća snaga izotropne antene}}.$$

Ovako definisano pojačanje antene je bezdimenzionalna veličina, jednaka ili veća od jedinice. Za većinu antena, pojačanje je veliki broj, pa je nepraktično koristiti njegovu pravu vrednost . Obično se ovaj količnik snaga izražava u decibelima

$$G = 10\log_{10}[\text{snaga sa antene/snaga sa izotropne antene}].$$

Snaga radarskog signala koja dolazi do radarskog cilja površine poprečnog preseka normalnog na pravac zračenja A_σ, koji se nalazi na rastojanju r od radara, je

$$P_\sigma = \frac{P_t G A_\sigma}{4\pi r^2}. \tag{8.11}$$

Od većine meta koje su detektovane radarom, energija se reflektuje izotropno u prostor. Neki radarski ciljevi mogu da reflektuju mnogo više u jednom pravcu nego u drugom, druge mogu da apsorbuju jedan deo primljene energije. Ako radarski cilj izotropno reflektuje i ako se zanemari apsorpcija, snaga reflektovanog radarskog zračenja koju primi antena radara je

$$P_r = \frac{P_\sigma A_e}{4\pi r^2} = \frac{P_t G A_\sigma A_e}{(4\pi)^2 r^4}, \tag{8.12}$$

A_e je efektivna površina antene. A_e je funkcija pojačanja antene i talasne dužine elektromagnetnih talasa radara

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}. \tag{8.13}$$

Zamenom A_e u jednačini (8.12) dobijamo

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 A_\sigma}{64\pi^3 r^4}. \tag{8.14}$$

U ovoj jednačini potrebno je uraditu još jednu promenu. Ona se odnosi na površinu radarskog cilja A_σ. Fizičke dimenzije radarskog cilja (koje odgovaraju veličini koju detektuje ljudsko oko) ne moraju da budu iste kao dimenzije koje detektuje radar. Radi prevazilaženje ovog problema, definisana je nova promenljiva, σ, koju nazivamo ***površina poprečnog preseka povratnog rasipanja mete***. Ova veličina zamenjuje površinu A_σ. Uz ovu izmenu, opšti oblik radarske jednačine za tačkasti cilj, koji se nalazi u centru antenskog snopa, možemo da napišemo u obliku

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{64\pi^3 r^4}. \tag{8.15}$$

8.3.2.1 Radarska jednačina za meteorološke ciljeve

Kišne kapi, pahulje snega, grad, oblačne kapljice itd. su rasuti radarski ciljevi. Takvi ciljevi se karakterišu prisustvom mnoštva efektivnih rasipajućih elemenata koji su istovremeno ozračeni. Zapremina koja sadrži ove deliće koji su istovremeno ozračeni je ***zapreminska rezolucija radara*** ili ***uzoračka zapremina*** i određena je širinom snopa i dužinom impulsa. Kod rasutih ciljeva koji se kreću međusobno, povratna snaga fluktuira u vremenu. Fluktuacije povratnog signala se javljaju zbog međusobnog kretanja rasipajućih elemenata, koje je prouzrokovano različitim brzinama padanja i promenom vetra u uzoračkoj zapremini. Trenutna snaga pulsirajućeg povratnog signala zavisi od rasporeda rasipajućih elemenata u vremenu i nije je jednostavno povezati sa površinom poprečnog preseka povratnog rasipanja. Pogodnim osrednjavanjem primljene snage, u praksi oko 10 ms, dobijamo

$$\overline{P}_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{64\pi^3 r^4} \sum_i \sigma_i, \tag{8.16}$$

$\sum_i \sigma_i$ je zbir površina poprečnog preseka rasipanja svih delića koji se nalaze u uzoračkoj zapremini radara. Uzoračka zapremina radara, u slučaju kada je radarski snop popunjen hidrometeorima, je

$$V \approx \frac{\pi\theta\phi r^2 c\tau}{8}, \tag{8.17}$$

θ je azimutna ugaona širina snopa, ϕ je elevaciona ugaona širina snopa, r je rastojanje impulsa od radara, c je brzina svetlosti i τ trajanje radarskog impulsa.

Ukupna površina poprečnog preseka rasipanja u uzoračkoj zapremini može da se napiše kao

$$\sum_i \sigma_i = V \cdot \sum_{i=1}^{N} \sigma_i = V\eta, \tag{8.18}$$

N je broj rasipajućih čestica u jedinici zapremine, σ_i je površina poprečnog preseka rasipanja i-te čestice i $\eta = \sum_{i=1}^{N} \sigma_i$ je površina poprečnog preseka rasipanja u jedinici zapremine. U opštem slučaju, meteorološki rasejači mogu imati različite oblike.

Mie (Keeler i Serafin, 2008) je razvio opštu teoriju za rasipanje unazad energije elektromagnetnog talasa na provodnoj sferi koja se nalazi u koloidnoj suspenziji. Ista teorija se primenjuje za sferne kišne kapi koje padaju u atmosferi, za koje je unazad rasuta energija funkcija talasne dužine upadnog zračenja, λ, i poluprečnika, a, i kompleksnog indeksa refrakcije, m, čestice. Količnik $2\pi a/\lambda$ određuje osnovne rasipajuće osobine čestice. Sferne kapljice vode u vazduhu dovoljno velike u odnosu na talasnu dužinu rasipaju u takozvanoj optičkoj oblasti, kapljice reda veličine talasne dužine rasipaju u tzv. regionu rezonantnog rasipanja i kapljice male u odnosu na talasnu dužinu rasipaju u Rejlijevoj oblasti.

Kada je količnik $2\pi a/\lambda < 1$ može se primeniti Rejlijeva aproksimacija, pa σ_i postaje

$$\sigma_i = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D_i^6, \tag{8.19}$$

D_i je prečnik i-te kapi i

$$|K|^2 = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \tag{8.20}$$

m je kompleksni indeks refrakcije sfere

$$m = n - ik \tag{8.21}$$

n je indeks refrakcije i k koeficijent apsorpcije. Na temperaturi između 0 i 20°C, za centimetarske talasne dužine, $|K|^2 \approx 0.93$ za vodu i $|K|^2 \approx 0.197$ za led.

Površinu poprečnog preseka rasipanja u jedinici zapremine možemo da napišemo u obliku

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_{i=1}^{N} D_i^6 \tag{8.22}$$

i da definišemo ***faktor radarske refleksivnosti*** Z kao

$$Z = \sum_{i=1}^{N} D_i^6. \tag{8.23}$$

U radarskoj meteorologiji je uobičajeno da se za jedinice za prečnike kapi koriste milimetri i da se vrši sumiranje jediničnih zapremina od 1 m^3. Prema tome, jedinica za radarsku refleksivnost Z je mm^6/m^3. Za čestice leda, D_i predstavlja

prečnik ekvivalentne kapi, tj. prečnik kapi vode koja bi se dobila kompletnim topljenjem čestice leda. Reflektovanje radarskih talasa za mnoge oblike i temperature čestica leda je ekstremno komplikovan proces i ne može se opisati nekim zajedničkim izrazom.

Često je pogodno da se raspodela kapi i čestica leda po veličini tretira kao neprekidna funkcija sa koncentracijom $N(D)$, gde je $N(D)dD$ broj kapi po jedinici zapremine koje imaju prečnik od D do $D+dD$. U ovom slučaju, Z je dato kao šesti moment funkcije raspodele

$$Z = \int_0^\infty N(D)D^6 dD. \tag{8.24}$$

Kombinujući jednačine (8.17), (8.18) i (8.23) i njihovom zamenom u (8.16) dobijamo

$$\overline{P}_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{64\pi^3 r^4} \frac{\pi\theta\phi r^2 c\tau}{8} \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum_{i=1}^{N} D_i^6 = \frac{\pi^3 c}{512} \frac{P_t G^2 \theta\phi\tau}{\lambda^2} |K|^2 \frac{Z}{r^2}. \tag{8.25}$$

Kada se uzme u obzir da pojačanje antene nije uniformno u celom radarskom snopu i kada se pretpostavi da pojačanje antene u radarskom snopu ima oblik gausove raspodele (Probert-Jones, 1962), radarska jednačina postaje

$$\overline{P_r} = \overbrace{\frac{\pi^3 c}{1024 \ln 2}}^{C_o} \underbrace{\left[\frac{P_t G^2 \theta\phi\tau}{\lambda^2}\right]}_{\text{parametri radara}} \overbrace{\left[|K|^2 \frac{Z}{r^2}\right]}^{\text{parametri cilja}}, \tag{8.26}$$

ili

$$\overline{P}_r = C_1 \frac{Z}{r^2}. \tag{8.27}$$

Uobičajeno je da se primljena snaga, $\overline{P}_r$, meri u milivatima (mW), radarska refleksivnost, Z, u mm^6/m^3 i r u kilometrima. Kako se $\overline{P}_r$ i Z mogu menjati za više redova veličine, pogodno je koristiti logaritamski oblik jednačine (8.27)

$$10\log_{10} Z = 10\log_{10} \overline{P}_r + 20\log_{10} r + C. \tag{8.28}$$

Veličina $10\log_{10} Z$ se zove faktor refleksivnosti u jedinicama dBZ (decibel u odnosu na 1 mm^6/m^3), $10\log_{10} \overline{P}$ je primljena snaga u dBm (decibel u odnosu na milivat). Konstanta C se zove konstanta meteorološkog radara i njena tipična vrednost kod operativnih meteoroloških radara je od 65 do 75 dBZ.

Jednačina (8.28) može da se koristi za merenje faktora radarske refleksivnosti u slučaju kada je radarski snop popunjen, kada je u važnosti Rejlijeva aproksimacija za male rasipajuće čestice i kada su te čestice čestice vode ili leda. S obzirom da ovi uslovi nisu uvek ispunjeni, uobičajeno je da se koristi efektivni faktor refleksivnosti Z_e umesto Z. Kada se koristi Z_e, podrazumeva se da su ovi uslovi ispunjeni.

Drugi faktor koji je zanemaren pri izvođenju radarske jednačine je slabljenje radarskog signala (atenuacija) na padavinskim elementima i gasovima u atmosferi. Na talasnoj dužini od 10 cm slabljenje nije značajno; međutim, na 5, 3 i 2 cm i posebno na milimetarskim talasnim dužinama u radarsku jednačinu se mora uvesti član L_a koji zavisi od rastojanja.

Važno je napomenuti da su vrednosti Z značajne u meteorologiji s obzirom da su direktno povezane sa karakteristikama oblaka i intenzitetom padavina. U oblacima koji ne daju padavine Z ima vrednost oko -40 dBZ. U donjim delovima optički vedrog atmosferskog graničnog sloja Z ima tipičnu vrednost od -20 dBZ do 20 dBZ i često nastaju zbog insekata i ptica. Kišne padavine daju refleksivnost od oko 0-10 dBZ do više od 60 dBZ. Jake olujne nepogode mogu da daju vrednost veću od 70 dBZ.

8.3.2.2 Relacija između Z i intenziteta padavina

Intenzitet padavina je među najvažnijim veličinama koje se mogu meriti pomoću radara. Količina padavina je značajna za poljoprivredu, vodosnabdevanje, upozorenje od poplava itd.

Intenzitet padavina, R, u funkciji raspodele kišnih kapi po veličini, $N(D)$, može da se napiše u obliku

$$R = \int_0^\infty N(D)\frac{4}{3}\left(\frac{D}{2}\right)^3 \pi u(D) dD, \tag{8.29}$$

$u(D)$ je terminalna brzina kišnih kapi u funkciji njihovog prečnika. Raspodela kišnih kapi po veličini je veoma promenljiva i zavisi od tipa padavina i od godišnjeg doba. Srednja raspodela kišnih kapi za konvektivne i tropske padavine, osrednjena po vremenu i prostoru, može da se opiše eksponencijalnom raspodelom

$$N(D) = N_o e^{-\lambda D}, \tag{8.30}$$

$N_o = 0.08$ cm^{-4} $= 8 \cdot 10^3$ m^{-3}mm^{-1} je parametar preseka, $\lambda = 41R^{-0.21}$ cm^{-1} $= 4.1R^{-0.21}$ mm^{-1} je parametar nagiba i R je intenzitet kišnih padavina u mm/h. Ako je poznata terminalna brzina kišnih kapi i njihova raspodela po veličini, mogu se na osnovu jednačina (8.24) i (8.29) izračunati Z i R i iz tih izraza bi dobili vezu u obliku

$$Z = aR^b, \tag{8.31}$$

gde su a i b konstante. Terminalna brzina kišnih kapi može da se aproksimira jednačinom

$$u(D) = 9.65 - 10.3e^{-600D}, \tag{8.32}$$

D je u metrima i $u(D)$ je u ms^{-1}. Iz jednačina (8.24) i (8.30), faktor radarske

refleksivnosti je

$$Z = \int_0^\infty N_o e^{-\lambda D} D^6 dD = \frac{N_o 6!}{\lambda^7} = \frac{N_o 6!}{(4.1R^{-0.21})^7}$$
$$= \frac{8 \cdot 10^3 6!}{(4.1R^{-0.21})^7} \frac{\mathrm{m}^{-3}\mathrm{mm}^{-1}}{\mathrm{mm}^{-7}} = 295.76R^{1.47} \frac{\mathrm{mm}^6}{\mathrm{m}^3}. \tag{8.33}$$

Dobijeni izraz je u saglasnosti sa empirijski dobijenom vezom između Z i R. Battan (1973) je predložio četiri izraza za $Z-R$ relaciju, koji odgovaraju različitim tipovima padavina:

$$\begin{aligned} Z &= 200R^{1.6} \quad \text{za stratiformne padavine,} \\ Z &= 31R^{1.71} \quad \text{za orografske padavine,} \\ Z &= 486R^{1.37} \quad \text{za kumulonimbusne padavine,} \\ Z &= 2000R^{2.0} \quad \text{za snežne padavine.} \end{aligned} \tag{8.34}$$

U ovim izrazima je, kao i ranije, Z u jedinicama $\mathrm{mm/m}^3$, a R u mm/h.

Radar prima signal i meri njegovu snagu $\overline{P}_r$. Iz radarske jednačine, npr. (8.28), može da se izračuna Z i da se proceni intenzitet padavina iz podesne $Z-R$ relacije. Tačan oblik $Z-R$ relacije zavisiće od tipa padavina i menjaće se sa tipom olujne nepogode i mestom u nepogodi.

PRIMER 8.4 *Izračunajte odgovarajući intenzitet kišnih padavina na mestu gde je izmerena vrednost radarske refleksivnosti od* $Z = 18$ dBZ. *Pretpostavite da su ekvivalentna refleksivnost i intenzitet padavina povezani relacijom*

$$Z_e(\mathrm{mm}^6\mathrm{m}^{-3}) = 300R^{1.4}\ (\mathrm{mmh}^{-1}).$$

rešenje: *Iz*

$$Z\ (\mathrm{dBZ}) = 10\log_{10}\frac{Z_e}{1\ \mathrm{mm}^6\mathrm{m}^{-3}},$$

ekvivalentna refleksivnost je

$$Z_e = 10^{(Z/10)}\ \mathrm{mm}^6\mathrm{m}^{-3},$$

pa se intenzitet padavina može napisati kao

$$R = [\frac{10^{(Z/10)}}{300}]^{(1/1.4)}.$$

Zamenom $Z = 18$ dBZ *dobijamo* $R \approx 0.33\ \mathrm{mmh}^{-1}$.

Teškoće povezane sa radarskim merenjem padavina su:

- kalibracija radara,
- nepoznata raspodela kišnih kapi,
- horizontalna i vertikalna komponenta vetra,

- slabljenje radarskog signala gasovima u atmosferi, kišnim padavinama i ovlaženom kupolom radara,
- povećanje refleksivnosti (svetla traka koja se javlja pri topljenju ledenih hidrometeora),
- nepotpuno popunjavanje radarskog snopa i
- isparavanje padavina i gradijenti intenziteta padavina.

Korekciju radarskih merenja moguće je izvršiti na osnovu poređenja sa rezultatima dobijenim mrežom kišomera na tlu.

8.3.3 Procena količine padavina ATI metodom

Ovaj metod dovodi u vezu količinu padavina sa veličinom oblasti u kojoj postoje padavine i njihovim trajanjem. Zapremina vode koja se akumulira na tlu površine $A(t)$ u intervalu vremena T može da se napiše kao

$$V = \int_T \int_{A(t)} R(a,t)\,da\,dt, \tag{8.35}$$

$R(a,t)$ je intenzitet padavina iznad određene oblasti a u vremenu t. Ako je intenzitet padavina konstantan, $R = R_c$, jednačina (8.35) može da se napiše kao

$$V = R_c \int_T \int_{A(t)} da\,dt. \tag{8.36}$$

Dvostruki integral u izrazu (8.36) nazvan je ATI (*eng. area time integral*), (Doneaud i dr., 1984), ili površina vreme integral. On se obično aproksimira sumom

$$\text{ATI} = \int_T \int_{A(t)} da\,dt = \sum_i A_i \Delta t_i, \tag{8.37}$$

A_i je površina iznad koje su detektovane padavine i Δt_i je interval između merenja. ATI se može računati za fiksiranu oblast na tlu, ili za određeni konvektivni sistem. Obično se ATI računa iz podataka koji se dobijaju radarom skeniranjem antene pri maloj vrednosti elevacionog ugla. Sumiraju se površine iz uzoračkih zapremina u kojima je radarska refleksivnost veća od neke referentne vrednosti Z_{ref}. Referentna vrednost refleksivnosti odgovara minimalnoj vrednosti intenziteta padavina za datu oblast.

Na primer, prag od 18 dBZ je korišćen u radu Lopez i dr. (1989), a 25 dBZ u radu Doneaud i dr. (1984). Vrednosti ATI su korelisane sa količinom padavina koja se dobija merenjem mrežom kišomera ili radarskom procenom preko $Z-R$ relacije. U različitim studijama su dobijeni veoma visoki koeficijenti korelacije. Lopez i dr. (1989) su dobili da je koeficijent korelacije između radarski procenjene količine padavina i ATI oko 0.92, za intervale vremena sumiranja, Δt, od 5 min do jednog sata. Za intervale veće od 3 h koeficijent korelacije je bio značajno manji. Optimalna vrednost intervala je 1h, jer se sa najmanje merenja dobija

koeficijent korelacije kao za interval od 5 min. Kada su ATI korelisane sa količinama padavina koje su izmerene kišomerima dobili su vrednost koeficijenta korelacije od 0.86, za intervale vremena sumiranja od 5 min do jednog sata.

Vučković (1990) je korelisao ATI merene u maju i junu 1989. godine u Srbiji sa podacima o padavinama izmerenim na kišomernim stanicama. ATI su merene radarima korišćenim u Sistemu zaštite od grada. Uzimane su u obzir površine sa radarskom refleksivnošću većom od $0.9 \times \mathrm{Max}(Z)$ za svaki oblak. Dobijeni koeficijent korelacije je bio 0.86.

Ovi rezultati, kao i rezultati dobijeni za druge geografske i klimatske regione, mogu dati jednostavan i jeftin metod za procenu količine padavina iznad prostrane oblasti korišćenjem dobro kalibrisanog konvencionalnog radara, bez upotrebe skupih mreža kišomera. Takođe, ATI metod se može koristiti za procenu padavina iz konvektivnih oblaka, koristeći skoro trenutna radarska merenja površine sa padavinama. ATI metod može biti primenljiv naročito u klimatološkim studijama.

Glava 9

Merenje isparavanja

Procene isparavanja sa slobodne vodene površine i zemljišta i evapotranspiracije sa površina obraslih vegetacijom su važne za potrebe hidrologije, meteorologije i poljoprivrede, za projektovanje i rad rezervoara, sistema za navodnjavanje i odvodnjavanje.

Na isparavanje sa nekog tela ili površine utiču meteorološki faktori i faktori povezani sa karakteristikama površine. Meteorološki faktori se mogu podeliti na energetske i aerodinamičke. Energija je potrebna da bi se voda prevela iz tečne u fazu pare. U prirodi se energija potrebna za isparavanje u najvećoj meri obezbeđuje sunčevim i dugotalasnim zračenjem. Aerodinamičke promenljive, kao što su brzina vetra pri površini i vertikalna promena parcijalnog pritiska vodene pare između površine i donje atmosfere, kontrolišu brzinu transporta isparene vodene pare. Takođe, na isparavanje utiču i količina i stanje vode na površini i površinske karakteristike koje utiču na transport pare do vazduha ili kroz površinu tela. Otpor na transport pare u atmosferu zavisi od hrapavosti površine; u pustinjskim oblastima veoma značajni su veličina i oblik isparavajuće površine. Transpiracija kroz biljke, pored meteoroloških i površinskih faktora, zavisi i od broja, veličine i stepena otvorenosti stoma (otvora u listovima). Otpor stoma na transport pare zavisi od doba dana i od vlage u tlu raspoložive za korenov sistem.

Količina vlage u tlu koja je raspoloživa za korenov sistem, kao i za isparavanje sa golog tla zavisi od kapilarnosti tla, tj. od njegove teksture i sastava. Isparavanje sa jezera i rezervoara zavisi od toplotnog kapaciteta vode u njima.

9.1 Definicije

- ***Stvarna evaporacija*** je količina vode koja ispari sa otvorene vodene površine ili sa tla.
- ***Transpiracija*** je proces kojim se voda kroz biljke prenosi u atmosferu u obliku vodene pare.
- ***Stvarna evapotranspiracija*** je količina vodene pare koja ispari sa zemlje ili biljaka pri prirodnoj vlažnosti tla.
- ***Potencijalna evaporacija*** je količina vodene pare koja bi mogla da bude

emitovana sa jedinične površine čiste vode u jedinici vremena pri postojećim atmosferskim uslovima.

- ***Potencijalna evapotranspiracija*** je maksimalna količina vode koja bi, u nekom klimatu, mogla da ispari sa šireg područja na kome je tlo potpuno obraslo vegetacijom i dobro snabdeveno vodom. Ona uključuje isparavanje sa tla i transpiraciju preko biljaka sa određene oblasti u određenom vremenskom intervalu, izražena kao dubina vode.

Brzina isparavanja je količina vode koja ispari sa jedinične površine u jedinici vremena. Ona se može izraziti kao masa ili zapremina tečne vode koja ispari sa površine u jedinici vremena, obično kao ekvivalentna dubina tečne vode koja u jedinici vremena ispari sa cele površine. Jedinica vremena je obično jedan dan. Količina isparene vode treba da bude očitana u milimetrima.

Isparavanje sa vlažnog tla ili čiste površine vode je kontinualan proces i zavisi od sledećih faktora:

- Dovođenja toplote (sunčevim i zemljinim zračenjem);
- Gradijenta parcijalnog pritiska vodene pare u blizini isparavajuće površine;
- Temperature isparavajuće površine;
- Brzine vetra iznad isparavajuće površine;
- Veličine isparavajuće površine;
- Promene barometarskog pritiska;
- Stanja isparavajuće površine (prisustvo talasa, ako je u pitanju površina vode, hrapavost tla i slično);
- Sadržaja rastvorljivih materija u vodi.

Pored ovih činilaca, na evapotranspiraciju utiču i

- Tip vegetacije;
- Dubina sloja u kome je koren aktivan;
- Ukupna površina lišća i stoma.

9.2 Metodi merenja isparavanja

Metodi procene isparavanja i evapotranspiracije su indirektni, zasnivaju se na tačkastim merenjima pomoću instrumenata ili na izračunavanjima na osnovu izmerenih vrednosti meteoroloških veličina. Isparavanje vode sa standardnih vlažnih (zasićenih) površina se meri ***evaporimetrima***. Oni se mogu podeliti na ***atmometre*** i na evaporimetre u obliku sudova ili rezervoara. Njima se ne može direktno meriti isparavanje sa prirodnih vodenih površina, kao ni stvarna

ni potencijalna evapotranspiracija. Zbog toga se dobijene vrednosti ne mogu, bez podešavanja, koristiti za realnu procenu isparavanja sa jezera ili stvarne i potencijalne evapotranspiracije sa prirodnih površina.

Evapotranspirometar (lizimetar) je podzemni rezervoar napunjen zemljom obrastao istom vegetacijom kao okolno zemljište. To je multifunkcionalni instrument za proučavanje nekoliko faza hidrološkog ciklusa pod prirodnim uslovima. Procene evapotranspiracije (ili evaporacije u slučaju golog tla) se mogu uraditi merenjem i uravnotežavanjem svih ostalih komponenata vodnog budžeta rezervoara: padavina, oticanja vode i promene sadržaja vode u zemljištu rezervoara. Površinsko oticanje se obično eliminiše. Evapotranspirometri takođe mogu da se koriste i za procenu potencijalnog isparavanja zemljišta ili za procenu potencijalne evapotranspiracije zemljišta obraslog biljkama, ukoliko se vlažnost zemljišta u rezervoaru održava na nivou zasićenja.

Procena isparavanja sa rezervoara ili malih jezera se može vršiti na osnovu vodnog budžeta, budžeta energije, aerodinamičkih i kombinovanih metoda.

Treba zapaziti da su merenja različitim evaporimetrima ili lizimetrima fizički različita, pa su i podešavajući faktori za njih različiti.

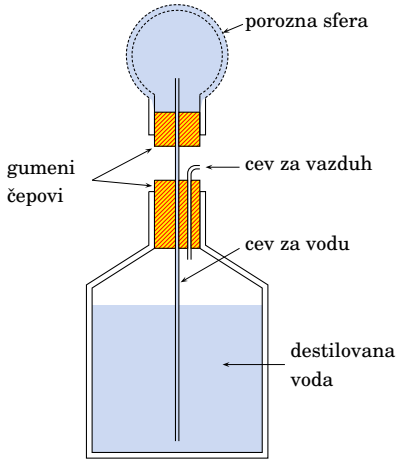
9.2.1 Atmometri

Atmometri su instrumenti kojima se meri gubitak vode isparavanjem sa ovlažene, porozne površine. Vlažne površine mogu biti porozne keramičke sfere, cilindri ili pločice ili diskovi filter papira nakvašenog vodom.

Isparavajuća površina kod ***Livingston***ovog atmometra je keramička sfera prečnika oko 5 cm i debljine oko 3 mm. Sfera je napunjena vodom i povezana staklenom ili metalnom cevi sa rezervoarom sa vodom, kao što je prikazano na slici 9.1. Voda se neprekidno crpi iz rezervoara brzinom koja zavisi od intenziteta isparavanja. Pri tome sfera i kapilara ostaju napunjene vodom zbog atmosferskog pritiska koji deluje na slobodnu površinu vode u rezervoaru. Smanjivanje nivoa vode u rezervoaru se uzima kao mera isparavanja. Ovaj tip atmometra je bio često korišćen u botanici i šumarstvu, jer daje dobru reprezentaciju isparavanja sa biljaka. Njegov nedostatak je što se lako lomi zamrzavanjem na niskim temperaturama.

Pišeov atmometar je graduisana epruveta prečnika 1.5 cm, dužine 30 cm, koja se puni destilovanom vodom, a na otvorenom delu se postavlja filter papir i fiksira metalnom štipaljkom. Epruveta se postavlja sa otvorenim krajem na dole, tako da voda kvasi filter papir i isparava. Isparavanje se procenjuje na osnovu smanjenja nivoa vode u epruveti.

Atmometri imaju tendenciju da precene uticaj vetra i potcene uticaj zračenja. Brzina isparavanja izmerena atmometrima je obično veća od brzine isparavanja izmerenog ispariteljima u obliku rezervoara. Iako se atmometri često koriste za dobijanje procene isparavanja sa zatravljenih površina, veza između stvarne količine isparavanja sa prirodnih površina i isparavanja izmerenog atmometrima zavisi od karakteristika površine i tipa klimata. Dobre strane atmometara su mala veličina, niska cena i mali vodni zahtevi. Osnovni problem pri korišćenju atmometara je prljanje isparavajuće površine.



Slika 9.1: Šematski prikaz Livingstonovog atmometra.

9.2.2 Evaporimetri u obliku sudova i rezervoara

Isparitelji ovog tipa se međusobno razlikuju po obliku i po načinu izlaganja. Najčešće su u upotrebi američki isparitelj klase A, ruski GGI-3000 i ruski isparitelj u obliku rezervoara površine 20 m^2. Podaci dobijeni ovim ispariteljima se mogu dovesti u stabilnu relaciju sa meteorološkim elementima koji određuju isparavanje, koja je prilično komplikovana i zavisna od klimatske zone. Pored merenja nivoa vode u isparitelju, za procenu isparavanja sa vodene površine, neophodno je meriti i količinu padavina. Za potrebe izračunavanja isparavanja na osnovu vrednosti meteoroloških elemenata koji utiču na isparavanje i proučavanja relacije između izmerenih i izračunatih vrednosti potrebno je na istom mestu meriti temperaturu i vlažnost vazduha, brzinu vetra, zračenje i temperaturu površinskog sloja vode u isparitelju.

9.2.2.1 Isparitelj klase A

Ovaj isparitelj je cilindrična posuda dubine 25.4 cm, prečnika 120.7 cm, napravljena od pocinkovanog lima ili neke nerđajuće legure. Dno suda se nalazi na visini od 3 do 5 cm iznad tla na drvenom postolju, koje omogućava nesmetanu cirkulaciju vazduha ispod suda. Sud se puni vodom do 5 cm ispod gornje ivice. U isparitelju se nalazi komora za sprečavanje mreškanja vode i na nju se za vreme merenja postavlja mikrometarski zavrtanj sa kukom. Ta komora je mesingani cilindrični sud visine 20 cm, prečnika 9 cm, sa trouglastim postoljem koje u sredini ima mali otvor. Komora za umirenje se obično postavlja na 30 cm od severne ivice isparitelja, tako da njena gornja ivica zauzima horizontalan položaj. Pri merenju nivoa vode vrh kuke mikrometarskog zavrtnja treba odozdo da dodiruje površinu vode.

Temperatura površinskog sloja vode u isparitelju se meri živinim termometrom za vodu. Anemometar se postavlja pored severozapadnog ugla drvenog postolja na kome stoji isparitelj. Čašice anemometra treba da budu na visini 2 m

iznad tla.

9.2.2.2 Isparitelj GGI-3000

To je isparitelj cilindričnog oblika prečnika 61.8 cm (površina 3000 cm^2), sa konusnim dnom (dubina do ivice je 60 cm, a u centru 68.5 cm). Isparitelj se ukopava u zemlju, a gornja ivica treba da bude na visini 7.5 cm iznad tla. U centru suda se nalazi metalna cev sa skalom na koju se za vreme merenja postavlja bireta*. Bireta ima ventil koji omogućava da se nivo vode u njoj izjednači sa nivoom vode u sudu. Tada se ventil zatvori i izmeri se zapremina vode u bireti. Visina nivoa vode iznad metalne cevi sa skalom se određuje na osnovu zapremine vode u bireti i dimenzija birete. Igla pričvršćena za cev sa skalom pokazuje visinu do koje nivo vode u sudu treba da bude podešen nakon merenja. Pored ovog isparitelja treba da postoji GGI-3000 kišomer sa veličinom prikupljajuće površine od 3000 cm^2.

9.2.2.3 Isparitelj površine 20 m^2

Ovaj isparitelj je rezervoar cilindričnog oblika, prečnika oko 5 m, dubine 2 m. Postavlja se u zemlju tako da je rastojanje gornje ivice suda od tla 7.5 cm. Nivo vode se održava približno na nivou tla. U rezervoaru je postavljena komora za sprečavanje mreškanja vode sa graduisanom cevi, na koju se postavlja bireta u toku merenja. Blizu graduisane cevi se postavlja štapić sa oštrim vrhom koji pokazuje visinu do koje treba podesiti nivo vode u rezervoaru.

9.2.2.4 Postavljanje isparitelja u obliku sudova i rezervoara

Postoje tri načina postavljanja ovih isparitelja:

a) Podzemno, kod koga je veći deo suda ukopan u zemlju, a isparavajuća površina je na nivou ili blizu nivoa okolnog tla;

b) Iznad tla, gde se ceo sud nalazi na nekoj maloj visini iznad tla;

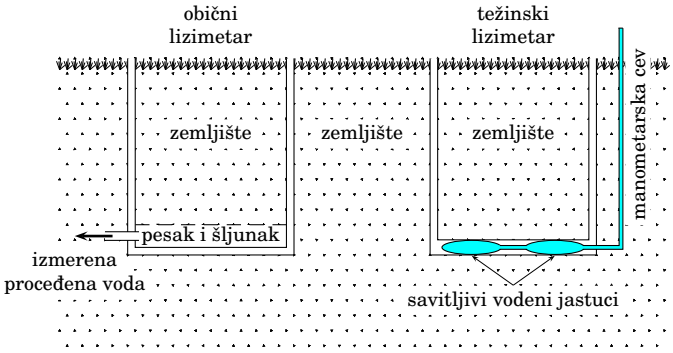
c) Na plovećoj platformi na jezerima ili drugim vodenim površinama.

Mesta na kojima se postavljaju isparitelji treba da budu ravna i otvorena, bez prepreka, kao što su drveće, zgrade, žbunje i sl. Takve pojedinačne prepreke moraju da budu udaljene od isparitelja na rastojanje najmanje pet puta veće od njihove visine. Za grupisane prepreke rastojanje mora da bude najmanje deset puta veće od visine prepreke.

9.2.3 Evapotranspirometri (lizimetri)

Lizimetari su za razliku od isparitelja u obliku sudova i rezervoara, koji su napunjeni vodom, napunjen zemljištem koje je obično obraslo biljnim pokrivačem. Osim toga, u lizimetrima je omogućeno proceđivanje vode kroz dno, a ko-

*Bireta je vertikalni cilindrični laboratorijski sud sa volumetrijskom graduacijom na celoj dužini i sa slavnom na dnu.



Slika 9.2: Opšti tipovi lizimetara (DeFelice, 2000).

ličina procеđene vode se meri. Procеđivanje je neophodno da bi lizimetar u najvećoj mogućoj meri odražavao okolno zemljište. Kao i kod isparitelja u obliku sudova i rezervoara neophodno je meriti padavine u neposrednoj blizini lizimetra. Ukoliko je biljni pokrivač u lizimetru sličan biljnom pokrivaču u okolnom zemljištu, efekat ivica će biti znatno manje izražen u poređenju sa ispariteljima u obliku sudova i rezervoara. Ako pretpostavimo da nema oticanja kroz bočne strane i da se ono vrši samo putem procеđivanja kroz dno, evapotranspiracija se može proceniti na osnovu opšte jednačine vodnog budžeta (hidrološkog balansa) za kontejner lizimetra

$$ET = P + I - P_c - \Delta W_s, \tag{9.1}$$

ET je masa vode koja napusti kontejner evapotranspiracijom, P količina vode koju kontejner dobije padavinama, I količina vode dobijena navodnjavanjem, P_c količina procеđene vode i ΔW_s promena količine vode sadržane u kontejneru lizimetra.

Na slici 9.2 prikazana su dva tipa lizimetara, težinski i obični. Težinski lizimetar ima uređaj postavljen ispod njega koji meri ukupnu masu lizimetra. Kod ovog tipa lizimetra procеđivanje se meri kontinuarno instrumentom koji radi na sličnom principu kao kišomer sa klackalicom. Promena mase se meri hidrauličnim barometrom, a istovremeno se meri i količina padavina kišomerom u blizini lizimetra.

Kod običnog lizimetra se pretpostavlja da je promena sadržaja vlage u tlu jednaka nuli u toku posmatranog perioda i evapotranspiracija se računa kao razlika između zbira količine padavina i navodnjavanja i količine procеđene vode.

$$ET = P + I - P_c.$$

To može da bude prihvatljiva pretpostavka za vremenski period reda godine, gde je masa zemljišta približno konstantna između dve zime.

U sofisticirane lizimetare (Yang i dr., 2000) se ugrađuju dodatni merni instrumenti za merenje vlažnosti tla, kao što su tenziometri i neutronske probe.

9.2.3.0.1 Tenziometar je instrument koji meri potencijal tla, odnosno, otpor tla na izvlačenje vode iz njega od strane korenovog sistema. Takođe, pomoću

tenziometra se može indirektno meriti vlažnost tla.

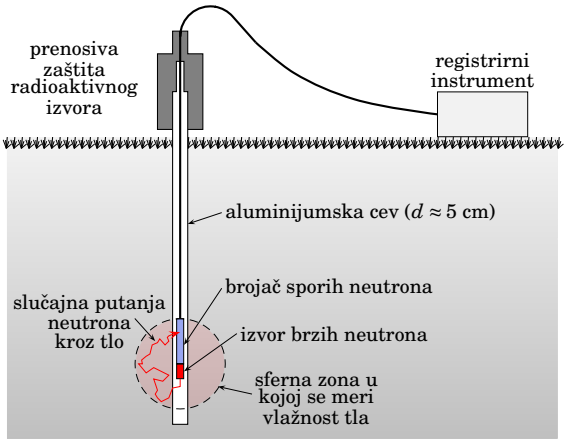
Tenziometar se sastoji od manometra koji je preko cevi povezan sa poroznim keramičkim vrhom. Cev je napunjena vodom i obično je napravljena od providnog materijala, kao što je pleksiglas, tako da nivo vode u njemu može lako biti vidljiv. Keramički vrh je propustljiv i lako se zasiti vodom iz cevi. Vrh se dovodi u kontakt sa tlom u zoni korena. Kako zemljište obično nije zasićeno vodom, voda se odvodi iz keramičkog vrha u zemljište. Zbog odvođenja vode u cevi se stvara vakuum, koji se meri manometrom. Ovo merenje nije direktno merenje sadržaja vode u zemljištu. Tačnije, to je merenje napona vode u tlu (ili napona vlage u tlu). Nivo pritiska (napona) u vakuumu je pokazatelj količine energije potrebne biljkama da se suprotstave snazi kojom tlo zadržava vlagu i izvuku vodu iz njega. Ako je tlo skoro zasićeno vodom, izvlačenje vode iz tenziometra u zemljište neće biti snažno, očitana vrednost će biti mala i biljkama neće trebati mnogo energije za crpljenje vode iz tla. Suvo tlo će snažno apsorbovati vodu iz tenziometra, stvoriće veći vakuum (veća očitana vrednost) u instrumentu i korenovom sistemu biljaka će biti potrebno više energije za izvlačenje vode iz tla. Napon vode u tlu je povezan sa potencijalom vode. To takođe nije sadržaj vode već potencijal tla da biljke snabde vodom. Sušenjem tla napon vode u tlu raste, a potencijal vode se smanjuje. Kada se sadržaj vode u tlu povećava zbog padavina ili navodnjavanja, napon vode u tlu se smanjuje, a potencijal vode u tlu se povećava. Pomoću tenziometra se omogućava monitoring fluktuacija potencijala vode u tlu. Očitavanje tenziometra je tačno sve dok vazduh ne uđe u cev. Vazduh koji eventualno može da se nađe u cevi se mora povremeno uklanjati, novim punjenjem vode.

9.2.3.0.2 Neutronska proba Neutronska proba, šematski prikazana na slici 9.3, koristi radioaktivni izvor za merenje sadržaja vlage u tlu. U zemljište se kroz postavljenu cev od PVC-a ili aluminijuma spušta radioaktivna proba do željene dubine na kojoj se meri sadržaj vlage. Radioaktivni izvor emituje brze neutrone koji se sudaraju sa molekulima zemljišta i jonima vodonika. Pri sudaru sa velikim molekulima zemljišta brzina neutrona se malo menja, a pri sudaru sa jonima vodonika, koji imaju približno istu masu, neutroni se usporavaju. Broj sporih neutrona, koji zavisi od sadržaja vode u tlu, meri se detektorom. Na ovaj način se meri sadržaj vode u sfernoj oblasti tla prečnika oko 25 cm u okolini sonde. Osnovni nedostaci ovog metoda su visoka cena probe, kao i postojanje posebnih zahteva koji se odnose na rad sa izvorima radioaktivnog zračenja i njihovo čuvanje.

9.3 Metodi izračunavanja isparavanja

Na isparavanje sa otvorene površine najviše utiču dva faktora: dovođenje energije koja se potroši na latentnu toplotu isparavanja i transport vodene pare od isparavajuće površine. Sunčevo zračenje je glavni izvor toplotne enegrije. Fluks vodene pare od isparavajuće površine zavisi od brzine vetra iznad površine i gradijenta specifične vlažnosti u vazduhu iznad površine.

Isparavanje sa tla čine direktno isparavanje sa tla i vegetacionih površina i transpiracija kroz listove biljaka. Voda koja ispari kroz listove se iz tla ekstra-



Slika 9.3: Šematski prikaz neutronske probe (DeFelice, 2000).

huje korenovim sistemom i prenosi uvis kroz kapilare biljaka i zatim isparava u atmosferu kroz stome. Proces koji uključuje isparavanje sa tla i transpiraciju kroz biljke se zove ***evapotranspiracija***.

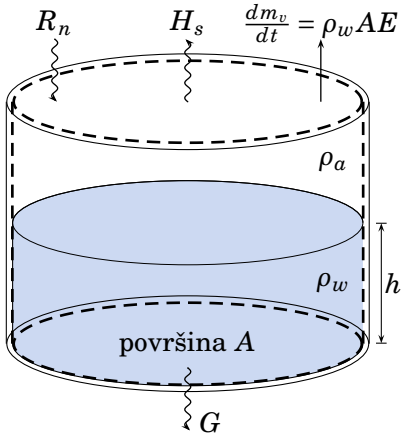
Evaporacija pored dva prethodno opisana faktora za isparavanje sa otvorene vodene površine zavisi i od dodavanja vlage isparavajućoj površini. Potencijalna evapotranspiracija je evapotranspiracija koja bi se realizovala na dobro obrasloj površini u slučaju da dodavanje vlage nije ograničeno i računa se na način sličan onom koji se koristi za isparavanje sa otvorene vodene površine. Sušenjem zemljišta stvarna evapotranspiracija opada ispod potencijalnog nivoa.

9.3.1 Metod energetske ravnoteže

Posmatraćemo isparavanje iz isparavajućeg rezervoara prikazanog na slici 9.4. Isparavajući rezervoar je sud sa vodom cilindričnog oblika. Brzina isparavanja u njemu se meri brzinom opadanja nivoa vode. Isprekidanom linijom je obeležena kontrolna zapremina i ona obuhvata vodu u rezervoaru i vazduh iznad njega. Kako kontrolna zapremina sadrži vodu u tečnoj i fazi pare, jednačina kontinuiteta mase treba da bude napisana posebno za svaku fazu. Ako masu tečne vode u rezervoaru obeležimo sa M i masu vodene pare sa m_v, promena mase vode u jedinici vremena zbog isparavanja je $-\frac{dm_v}{dt} = \frac{dM}{dt}$. Jednačina kontinuiteta za tečnu fazu je

$$-\frac{dm_v}{dt} = \frac{d}{dt}\iiint_{cv} \rho_w dV + \iint_{cs} \rho_w \mathbf{V}\cdot d\mathbf{A}, \tag{9.2}$$

cv je kontrolna zapremina i cs je površina koja koja ograničava kontrolnu zapreminu. Kako rezervoar nema propustljive zidove, ne postoji tok tečne vode kroz kontrolnu površinu, pa je $\iint_{cs} \rho_w \mathbf{V}\cdot d\mathbf{A} = 0$. Brzina promene tečne vode u sistemu je data integralom $\frac{d}{dt}\iiint_{cv} \rho_w dV = \frac{d}{dt}(\rho_w A h) = \rho_w A \frac{dh}{dt}$, gde je A površina poprečnog preseka rezervoara i h dubina vode u njemu. Zamenom u jednačinu (9.2)



Slika 9.4: Kontrolna zapremina korišćena pri izvođenju jednačina kontinuiteta mase i energije za isparavanje vode sa otvorenog cilindričnog rezervoara.

dobijamo

$$-\frac{dm_v}{dt} = \rho_w A \frac{dh}{dt}$$

ili

$$\frac{dm_v}{dt} = \rho_w AE, \tag{9.3}$$

gde je $E = -\frac{dh}{dt}$ brzina isparavanja. Jednačina kontinuiteta za vodenu paru je

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{d}{dt}\iiint_{cv} q_v \rho_a dV + \iint_{cs} q_v \rho_a \mathbf{V}\cdot\mathbf{dA}. \tag{9.4}$$

Za stacionarni tok vazduha iznad rezervoara, izvod po vremenu mase vodene pare u kontrolnoj zapremini je jednak nuli, pa je

$$\frac{dm_v}{dt} = \iint_{cs} q_v \rho_a \mathbf{V}\cdot\mathbf{dA}. \tag{9.5}$$

Iz jednačina (9.5) i (9.3) dobijamo jednačinu kontinuiteta za kontrolnu zapreminu u obliku

$$\rho_w AE = \iint_{cs} q_v \rho_a \mathbf{V}\cdot\mathbf{dA}. \tag{9.6}$$

U opštijem slučaju poslednja jednačina se može koristiti za definisanje brzine isparavanja ili brzine evapotranspiracije kada se napiše u obliku

$$E = \frac{1}{\rho_w A}\iint_{cs} q_v \rho_a \mathbf{V}\cdot\mathbf{dA} \tag{9.7}$$

gde je E ekvivalentna dubina vode koja ispari u jedinici vremena.

Energetska ravnoteža hidrološkog sistema primenjena na vodu u kontrolnoj zapremini može da se napiše kao

$$\frac{dH}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}\iiint_{cv}(u + \frac{1}{2}V^2 + gz)\rho_w dV + \iint_{cs}(u + \frac{1}{2}V^2 + gz)\rho_w \mathbf{V}\cdot\mathbf{dA} \quad (9.8)$$

$\frac{dH}{dt}$ je brzina dovođenja energije iz spoljašnjih izvora, $\frac{dW}{dt}$ je rad koji sistem izvrši u jedinici vremena, u je specifična unutrašnja energija vode, a integrali na desnoj strani su, redom, brzina promene energije u kontrolnoj zapremini i ukupan fluks energije kroz kontrolnu površinu. Za vodu u rezervoaru je $\mathbf{V} = 0$ i brzina promene nivoa je veoma mala, pa se jednačina 9.8 može napisati kao

$$\frac{dH}{dt} = \frac{d}{dt}\iiint_{cv} u\rho_w dV. \quad (9.9)$$

Posmatraćemo jediničnu površinu vode. Izvor toplotne energije je neto radijacioni fluks R_n, meren u vatima po kvadratnom metru, fluks osetne toplote od vode ka vazduhu je H_s i od vode ka tlu G, pa je

$$\frac{dH}{dt} = R_n - H_s - G.$$

Ako pretpostavimo da se temperatura vode u kontrolnoj zapremini ne menja sa vremenom, jedina promena količine toplote u kontrolnoj zapremini je promena unutrašnje energije isparene vode, koja je jednaka $L_v\frac{dm_v}{dt}$. L_v je latentna toplota isparavanja vode. Jednačinu (9.9) možemo da napišemo u obliku

$$R_n - H_s - G = L_v\frac{dm_v}{dt}. \quad (9.10)$$

Zamenom $\frac{dm_v}{dt}$ iz (9.3), za $A = 1\ \mathrm{m}^2$, dobijamo jednačinu energetske ravnoteže za isparavanje

$$L_v\rho_w E = R_n - H_s - G \quad \Rightarrow \quad E = \frac{1}{L_v\rho_w}(R_n - H_s - G). \quad (9.11)$$

Ako su fluksevi osetne toplote H_s i G jednaki nuli, tad se brzina isparavanja E_r može izračunati kao brzina pri kojoj se svo dolazno neto zračenje troši na isparavanje

$$E_r = \frac{R_n}{L_v\rho_w}. \quad (9.12)$$

PRIMER 9.1 *Izračunajte metodom energetske ravnoteže brzinu isparavanja sa otvorene površine, ako je neto iradijansa* 200 Wm^{-2} *i temperatura vazduha* 25°C*, ako nema flukseva osetne toplote.*

rešenje: *Latentna toplota isparavanja vode na temperaturi od* 25°C *je* $L_v = 2.5008 \times 10^6(1 - 9.477 \times 10^{-4} \times 25) = 2.4412 \times 10^6\ \mathrm{Jkg}^{-1}$ *a gustina vode* $\rho_w = 997\ \mathrm{kgm}^{-3}$*, pa je*

$$E_r = \frac{200\ \mathrm{Wm}^{-2}}{2.4412 \times 10^6 \times 997\ \mathrm{kgm}^{-3}} = 7.1\ \mathrm{mmdan}^{-1}.$$

9.3.2 Aerodinamički metod

Osim dovođenja toplote, brzinu isparavanja sa otvorene vodene površine kontroliše i transport vodene pare od isparavajuće površine. Brzina ovog transporta zavisi od gradijenta vlažnosti u vazduhu blizu površine i brzine vetra iznad površine. Ova dva procesa se mogu analizirati pomoću jednačina za transport mase vodene pare i transport količine kretanja u vazduhu.

Posmatraćemo horizontalnu jediničnu površinu u kontrolnoj zapremini, na visini z iznad nivoa vode. Fluks mase vodene pare na gore konvekcijom kroz ovu površinu je

$$\frac{dm_v}{dt} = -\rho_a K_w \frac{dq_v}{dz}, \tag{9.13}$$

K_w je difuzivnost vodene pare. Fluks količine kretanja na gore kroz pomenutu površinu je

$$\tau = \rho_a K_m \frac{du}{dz}, \tag{9.14}$$

K_m je difuzivnost količine kretanja.

Pretpostavimo da imamo izmerene vrednosti brzine vetra u_1 i specifične vlažnosti q_{v1} na visini z_1 i u_2 i q_{v2} na visini z_2 i da su visine z_1 i z_2 dovoljno blizu da se fluksevi $\frac{dm_v}{dt}$ i τ ne menjaju između njih. Ako izvode po visini u jednačinama (9.13) i (9.14) aproksimiramo izrazima

$$\frac{dq_v}{dz} = \frac{q_{v2} - q_{v1}}{z_2 - z_1} \text{ i } \frac{du}{dz} = \frac{u_2 - u_1}{z_2 - z_1}$$

dobićemo

$$\frac{dm_v}{dt} = \tau \frac{K_w(q_{v1} - q_{v2})}{K_m(u_2 - u_1)}. \tag{9.15}$$

Brzina vetra u donjem delu prizemnog graničnog sloja (do 50 m od tla) se može dobro opisati logaritamskim profilom

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_o}, \tag{9.16}$$

$u^* = \sqrt{\tau/\rho_a}$ je brzina smicanja, k je fon Karmanova konstanta, za čiju vrednost se obično uzima 0.4 i z_o je visina hrapavosti. Odavde,

$$u_2 - u_1 = \frac{u^*}{k}(\ln \frac{z_2}{z_o} - \ln \frac{z_1}{z_o}) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z_2}{z_1} \quad \Rightarrow \quad u^* = \frac{k(u_2 - u_1)}{\ln \frac{z_2}{z_1}}.$$

Kako je, po definiciji, $\tau = \rho_a u^{*2}$, dobijamo

$$\tau = \rho_a \left[\frac{k(u_2 - u_1)}{\ln \frac{z_2}{z_1}} \right]^2.$$

Zamenom dobijenog rezultata u jednačinu (9.15) dobijamo Torntvajt-Holcmanovu jednačinu za transport vodene pare

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{K_w k^2 \rho_a (q_{v1} - q_{v2})(u_2 - u_1)}{K_m \ln^2 \frac{z_2}{z_1}}. \tag{9.17}$$

Pri njenom korišćenju obično se uzima da je $\frac{K_w}{K_m} = 1$.

Ako ne postoje merenja specifične vlažnosti i brzine vetra na različitim visinama, već samo na standardnoj visini na klimatološkim stanicama, jednačina (9.17) se pojednostavljuje pretpostavljajući da je brzina vetra $u_1 = 0$ na visini hrapavosti z_o i da je tu vazduh zasićen. Na visini z_2 za parcijalni pritisak vodene pare se uzima izmereni pritisak vodene pare u vazduhu e, a specifična vlažnost se računa iz izraza $q_v = 0.622\frac{e}{p}$. Za pritisak pare na površini se uzima vrednost zasićenog pritiska pare e_s na izmerenoj temperaturi vazduha. Pod ovim pretpostavkama jednačina (9.17) se može napisati kao

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{0.622 k^2 \rho_a (e_s - e) u_2}{p \ln^2 \frac{z_2}{z_o}}. \tag{9.18}$$

Ako se podsetimo da je $\frac{dm_v}{dt}$ ovde definisano za jediničnu površinu, ekvivalentna brzina isparavanja E_a se može naći iz izraza $\frac{dm_v}{dt} = \rho_w E_a$ kao

$$E_a = B(e_s - e) \tag{9.19}$$

i

$$B = \frac{0.622 k^2 \rho_a u_2}{p \rho_w \ln^2 \frac{z_2}{z_o}}. \tag{9.20}$$

Jednačina (9.19) je opšti oblik za različite jednačine isparavanja, kod kojih se koeficijent transporta pare B menja od jednog mesta do drugog. Ovakav oblik jednačine prvi je predložio Dalton 1802. godine (Chow i dr., 1988).

PRIMER 9.2 *Izračunajte brzinu isparavanja sa otvorene vodene površine aerodinamičkim metodom, ako je temperatura vazduha* 25°C*, relativna vlažnost* 40%*, pritisak* 101.3 kPa *i brzina vetra* 3 ms^{-1}*. Sve veličine su merene na visini* 2 m *iznad vode. Pretpostavite da je visina hrapavosti* $z_o = 0.03$ *cm.*

rešenje: *Koeficijent transporta pare može da se napiše u obliku*

$$B = \frac{0.622k^2\rho_a u_2}{\rho_a RT\rho_w \ln^2 \frac{z_2}{z_o}} = \frac{0.622k^2 u_2}{R_d(1+0.608q_v)T\rho_w \ln^2 \frac{z_2}{z_o}}$$
$$= \frac{0.622k^2 u_2}{R_d(1+0.608\cdot 0.622\frac{Ue_s}{p})T\rho_w \ln^2 \frac{z_2}{z_o}}.$$

Pritisak zasićene vodene pare na temperaturi 25°C*, izračunat pomoću izraza (4.5), je* $e_s = 31.968\times 10^2$ Pa*. Za* $k = 0.4$ *i* $\rho_w = 997$ kgm^{-3} *B je jednako*

$$B = \frac{0.622\times 0.4^2\times 3\ \text{ms}^{-1}}{287\ \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}(1+0.608\cdot 0.622\frac{0.4\times 31.968\times 10^2\ \text{Pa}}{101300\ \text{Pa}})293.15\ \text{K}\times 997\ \text{kgm}^{-3}\ln^2\frac{2\ \text{m}}{3\times 10^{-4}\ \text{m}}}$$
$$= 4.57\times 10^{-11}\ \frac{\text{m}}{\text{Pa}\cdot\text{s}}.$$

Ekvivalentna brzina isparavanja je

$$E_a = B(e_s - e) = Be_s(1-U)$$
$$= 4.57\times 10^{-11}\ \frac{\text{m}}{\text{Pa}\cdot\text{s}}\times 31.968\times 10^2\ \text{Pa}\times(1-0.4) = 8.76\ \text{ms}^{-1}$$
$$= 7.57\ \text{mmdan}^{-1}.$$

9.3.3 Kombinovani aerodinamički i energetski metod

Aerodinamički metod se može koristiti za računanje isparavanja ukoliko dovođenje energije nije ograničeno. Metod balansa energije se koristi u slučajevima kada transport vodene pare nije ograničen. Obično su i jedan i drugi faktor ograničeni, pa je za izračunavanje isparavanja neophodna upotreba kombinacije ova dva metoda. U metodu balansa energije je teško izmeriti fluks osetne toplote H_s. Budući da se transport toplote vrši konvekcijom kroz vazduh iznad površine vode, i da se transport vodene pare odvija na sličan način, može se pretpostaviti da je fluks latentne toplote, $L_v\frac{dm_v}{dt}$, proporcionalan fluksu osetne toplote H_s. Konstanta proporcionalnosti se naziva ***Boven***ov (Bowen) količnik,

$$\beta = \frac{H_s}{L_v\frac{dm_v}{dt}}. \tag{9.21}$$

Ako pretpostavimo da je fluks toplote ka tlu $G = 0$, jednačinu (9.10) možemo da napišemo u obliku

$$R_n = H_s + L_v\frac{dm_v}{dt} = \beta L_v\frac{dm_v}{dt} + L_v\frac{dm_v}{dt} = L_v\frac{dm_v}{dt}(1+\beta). \tag{9.22}$$

Bovenov količnik se računa spajanjem jednačina transporta za vodenu paru i toplotu, što je slično korišćenju jednačina za transport vodene pare i količine kretanja kod izvođenja Torntvajt-Holcmanove jednačine. Jednačine transporta vodene pare i toplote su

$$\frac{dm_v}{dt} = -\rho_a K_w\frac{dq_v}{dz} \tag{9.23}$$

i

$$H_s = -\rho_a c_p K_h \frac{dT}{dz}, \tag{9.24}$$

c_p je specifična toplota za vazduh pri konstantnom pritisku i K_h je difuzivnost toplote. Koristeći izmerene vrednosti q_v i T na dva različita nivoa z_1 i z_2 i pretpostavku da su brzine transporta konstantne u sloju vazduha između ova dva nivoa, deljenjem (9.24) sa (9.23) dobijamo

$$\frac{H_s}{\frac{dm_v}{dt}} = \frac{c_p K_h (T_2 - T_1)}{K_w (q_{v2} - q_{v1})}. \tag{9.25}$$

Ako specifičnu vlažnost napišemo u obliku $q_v = 0.622\frac{e}{p}$ i jednačinu (9.25) podelimo sa L_v dobićemo izraz za Bovenov količnik

$$\beta = \frac{c_p K_h p (T_2 - T_1)}{0.622 L_v K_w (e_2 - e_1)}$$

ili

$$\beta = \gamma \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} \tag{9.26}$$

gde je

$$\gamma = \frac{c_p K_h p}{0.622 L_v K_w} \tag{9.27}$$

psihrometarska konstanta. Obično se uzima da je količnik difuzivnosti toplote i vodene pare u vazduhu $\frac{K_h}{K_w}$ jednak jedinici.

Ako je visina 1 visina isparavajuće površine, a visina 2 se nalazi u vazduhu iznad nje, može da se pokaže da se kombinacijom brzine isparavanja E_r računate preko neto zračenja (9.12) i brzine isparavanja računate aerodinamičkim metodom (9.19) može dobiti ponderisana procena brzine isparavanja

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a, \tag{9.28}$$

γ je psihrometarska konstanta i Δ je promena pritiska zasićene vodene pare sa temperaturom $\Delta = \frac{de_s}{dT}$ na temperaturi vazduha T_a. Jednačinu (9.28) je izveo Penman (1948) i ona predstavlja osnovnu jednačinu kombinovanog metoda za računanje isparavanja.

Kombinovani metod za računanje isparavanja na osnovu izmerenih meteoroloških podataka je najtačniji metod u slučajevima kada su ispunjene sve pretpostavke i kada su raspoloživi svi podaci. Glavna pretpostavka metoda energetske ravnoteže je da preovlađuje stacionarni transport energije i da promene količine toplote u vodi sa vremenom nisu velike. Ova pretpostavka ograničava primenu ovog metoda na intervale vremena reda veličine jednog dana i veće i na relativno male količine vode (nije pogodna za velika jezera). Osnovna pretpostavka aerodinamičkog metoda je povezana sa oblikom koeficijenta transporta vodene

pare, B u jednačini (9.19). Predloženi su različiti empirijski oblici koeficijenta B, u zavisnosti od lokalno osmotrenog vetra i ostalih meteoroloških podataka.

PRIMER 9.3 *Izračunajte brzinu isparavanja kombinovanim metodom sa otvorene vodene površine ako su sledeće vrednosti izmerene na visini* 2 m *iznad površine: neto iradijansa* 200 Wm^{-2}*, temperatura vazduha* 25°C*, relativna vlažnost* 40%*, brzina vetra* 3 ms^{-1} *i atmosferski pritisak* 101.3 kPa*.*

rešenje: *Iz primera* 9.1 *brzina isparavanja koja odgovara neto iradijansi od* 200 Wm^{-2} *je* $E_r = 7.1$ mmdan^{-1}*. U primeru* 9.2 *brzina isparavanja izračunata aerodinamičkim metodom za date vrednosti temperature vazduha, vlažnosti i brzine vetra je* $E_a = 7.57$ mmdan^{-1}*. Za kombinovani metod je potrebno izračunati koeficijente* Δ *i* γ *u jednačini* 9.28*. Psihrometarski koeficijent za izmerene vrednosti i za* $\frac{K_h}{K_w} = 1$ *je*

$$\gamma = \frac{c_p K_h p}{0.622 L_v K_w} = \frac{1004\ \mathrm{Jkg}^{-1}\mathrm{K}^{-1} \times 1 \times 101.3 \times 10^3\ \mathrm{Pa}}{0.622 \times 2.4412 \times 10^6\ \mathrm{Jkg}^{-1}} = 66.9\ \mathrm{PaK}^{-1}.$$

Diferenciranjem izraza za pritisak zasićene vodene pare (4.5) po temperaturi dobićemo

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{d}{dT}[6.1365 \exp(\frac{17.502T}{240.94+T})] = \frac{4217.46}{(240.97+T)^2}\ e_s.$$

Na temperaturi 25°C*,* $e_s = 31.968 \times 10^2$ Pa *i*

$$\Delta = \frac{4217.46}{(240.97+25)^2} \times 31.968 \times 10^2\ \mathrm{Pa} = 190.6\ \mathrm{PaK}^{-1}.$$

Brzina isparavanja je

$$\begin{aligned} E =& \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}E_r + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma}E_a \\ =& \frac{190.6}{190.6+66.9} \times 7.1\ \mathrm{mmdan}^{-1} + \frac{66.9}{190.6+66.9} \times 7.57\ \mathrm{mmdan}^{-1} \\ =& 0.74 \times 7.1\ \mathrm{mmdan}^{-1} + 0.26 \times 7.57\ \mathrm{mmdan}^{-1} \\ =& 7.2\ \mathrm{mmdan}^{-1}. \end{aligned}$$

Kombinovani metod je pogodan za male površine sa detaljnim klimatološkim podacima. Zahtevani podaci uključuju neto zračenje, temperaturu vazduha, vlažnost, brzinu vetra i pritisak. Ako nedostaje neki od ovih podataka, mora se koristiti jednostavnija jednačina isparavanja. Za isparavanje sa veoma velikih površina, energetski balans u najvećoj meri kontroliše brzinu isparavanja. Pristli i Tejlor (Priestley i Taylor, 1972) su procenili da je za takve situacije drugi član u (9.28) aproksimativno 30% prvog, pa se tada (9.28) svodi na Pristli-Tejlorovu jednačinu isparavanja

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}E_r, \tag{9.29}$$

$\alpha = 1.3$. Drugi autori su potvrdili ispravnost ovog pristupa, a vrednost α se malo menja zavisno od lokacije.

Merenja dobijena ispariteljem u obliku rezervoara su najreprezentativnija

za procenu isparavanja sa otvorene vodene površine. Izmerene vrednosti E_p treba pomnožiti faktorom isparitelja $k_p (0 \leq k_p \leq 1)$ da bi se dobile ekvivalentne vrednosti isparavanja sa otvorene vodene površine. Faktor isparitelja je obično $k_p \approx 0.7$ i menja se sa promenom godišnjeg doba i lokacije.

PRIMER 9.4 *Koristeći Pristli-Tejlorov metod izračunajte brzinu isparavanja sa vodene površine, ako je neto iradijansa* 200 Wm^{-2} *i temperatura vazduha* 25°C.

rešenje:

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r = 1.3 \times \frac{190.6}{190.6 + 66.9} \times 7.1 \text{ mmdan}^{-1}$$
$$= 6.8 \text{ mmdan}^{-1}.$$

Glava 10

Merenje vidljivosti

Merenje vidljivosti je određivanje rastojanja na kojem ljudi mogu videti objekte. Vidljivost je povezana sa vidljivom svetlošću (0.4 do 0.7 μm), sa osetljivošću ljudskog oka na takvu svetlost i sa transparentnošću atmosfere.

10.1 Definicije

U skladu sa WMO, meteorološka vidljivost u toku dana je definisana kao najveće rastojanje na kojem može da se vidi i prepozna crni objekat pogodnih dimenzija, koji se nalazi blizu tla naspram pozadine u obliku magle, neba, itd. Vidljivost noću je definisana kao najveće rastojanje na kojem se svetlost umerenog intenziteta može videti i identifikovati.

Slabljenje svetlosti u atmosferi opisano je Berovim zakonom

$$E = E_o e^{-k\rho x}, \tag{10.1}$$

E je iradijansa vidljive svetlosti u Wm^{-2}, k koeficijent slabljenja (ekstinkcije) u $\mathrm{m}^2\mathrm{kg}^{-1}$, ρ gustina vazduha (kgm^{-3}), x dužina putanje (m) i E_o iradijansa na početku putanje. Slabljenje svetlosti u atmosferi je posledica apsorpcije i rasipanja svetlosti na hidrometeorima (čestice vode i leda) i litometeorima (ostale vrste čestica u atmosferi kao npr. čestice dima i smoga).

Transmitivnost svetlosti, T, pri prolasku rastojanja x kroz atmosferu je

$$T = \frac{E}{E_o} = e^{-k\rho x}. \tag{10.2}$$

Radi pojednostavljenja merenja vidljivosti pomoću instrumenata, definisana je veličina ***meteorološko optičko rastojanje*** (MOR). MOR je dužina puta u atmosferi koja je potrebna da redukuje intenzitet svetlosti u usmerenom snopu na 0.05 od njene početne vrednosti. Standardni izvor svetlosti je prema definiciji užarena lampa temperature 2700 K.

Ako se primeni jednačina (10.2) na definiciju MOR-a ($T = 0.05$), tada je $x = V$, gde je V vidljivost ili MOR. Tada možemo da napišemo

$$T = 0.05 = e^{-k\rho V}. \tag{10.3}$$

Odavde, matematička relacija između MOR-a i koeficijenta ekstinkcije je

$$V = \frac{1}{k\rho} \ln \frac{1}{0.05} \approx \frac{3}{k\rho}. \tag{10.4}$$

Iz jednačina (10.4) i (10.2) možemo da dobijemo

$$V = x \frac{\ln 0.05}{\ln T}. \tag{10.5}$$

Ova jednačina je osnovna jednačina za merenje MOR-a pomoću transmisiometra.

Osmatrač određuje vidljivost na osnovu kontrasta između objekta i njegove pozadine (horizonta). Kontrast može da se definiše kao

$$C = \frac{B_o - B_b}{B_b}, \tag{10.6}$$

B_o je sjajnost objekta, B_b je sjajnost pozadine (horizonta) i C je kontrast. Sjajnost horizonta nastaje od svetlosti koja se rasipa od atmosfere prema oku posmatrača. Treba zapaziti da je kontrast negativan ako je objekat tamniji od pozadine, i kada je objekat crn ($B_o = 0$), $C = -1$. Opseg kontrasta je $-1 \leq C \leq \infty$. Kritični kontrast, C_c, je kontrast kada je objekat jedva vidljiv u odnosu na pozadinu; njegova vrednost je obično 0.05 (ponekad 0.02), ali je u velikoj meri funkcija individualnog čula vida osmatrača, kao i ugaonih dimenzija objekta, sjajnosti i opšte osvetljenosti. Košmider je 1924. godine (Middleton, 1957) uspostavio relaciju, kasnije poznatu kao Košmiderov zakon, između stvarnog kontrasta objekta i neba na horizontu koji vidi udaljeni osmatrač, C_x, i stvarnog kontrasta, C_o, to jest kontrasta između objekta i horizonta kada se objekat posmatra sa veoma bliskog rastojanja. Košmiderova relacija može da se napiše kao

$$C_x = C_o e^{-k\rho x}. \tag{10.7}$$

Ova relacija je u važnosti u slučaju kada koeficijent rasipanja ne zavisi od azimutnog ugla i kada postoji uniformna osvetljenost duž celog rastojanja između osmatrača, objekta i horizonta.

Ako se posmatra crni objekat u odnosu na horizont ($C_o = -1$) i ako je stvarni kontrast -0.05, jednačina (10.7) postaje

$$0.05 = e^{-k\rho x}.$$

Poredeći ovaj rezultat sa jednačinom (10.3) vidimo da je u slučaju kada je vrednost stvarnog kontrasta crnog objekta, u odnosu na horizont, jednaka 0.05, taj objekat se nalazi na meteorološkom optičkom opsegu.

Osmatrač određuje vidljivost u toku noći na osnovu slabljenja svetlosti umerenog intenziteta na poznatom rastojanju. Vidljivost koju određuje osmatrač u toku noći se razlikuje od dnevne vidljivosti. Kao prvo, dnevna vidljivost je izmenjena zbog svetlosti koja se rasipa u oči osmatrača i ne potiče od objekta koji se posmatra. Čestice u atmosferi na kojima se vrši rasipanje imaju dvostruku

ulogu: rasipaju svetlost van putanje od objekta do osmatrača i rasipaju drugu svetlost u oči osmatrača. Oba efekta smanjuju kontrast i definiciju objekta.

Drugo, periferni delovi mrežnjače, najkorisnije za noćni vid, gube opažanje boje ali postaju osetljiviji na niske nivoe svetlosti. Noćni vidljivi opseg je obično duži (oko dva puta) od dnevne vidljivosti, ali zavisi od osmatrača i od prisustva ostalog osvetljenja (gradsko osvetljenje, mesečina, suton).

Na dnevnu vidljivost utiču sledeći faktori:

- osobine osmatračevog vida,
- vrednosti koeficijenta ekstinkcije u atmosferi,
- sjajnost objekta i horizonta,
- nagib Sunca,
- ugaono rastojanje između Sunca i objekta i
- veličina objekta.

Ovi efekti komplikuju problem korelisanja vidljivosti merene instrumentima sa vidljivim opsegom čoveka. Dnevni vidljivi opseg se uzima kao standardni. Konverzija noćne vidljivosti u dnevnu se vrši pomoću standardnih tabela i grafikona.

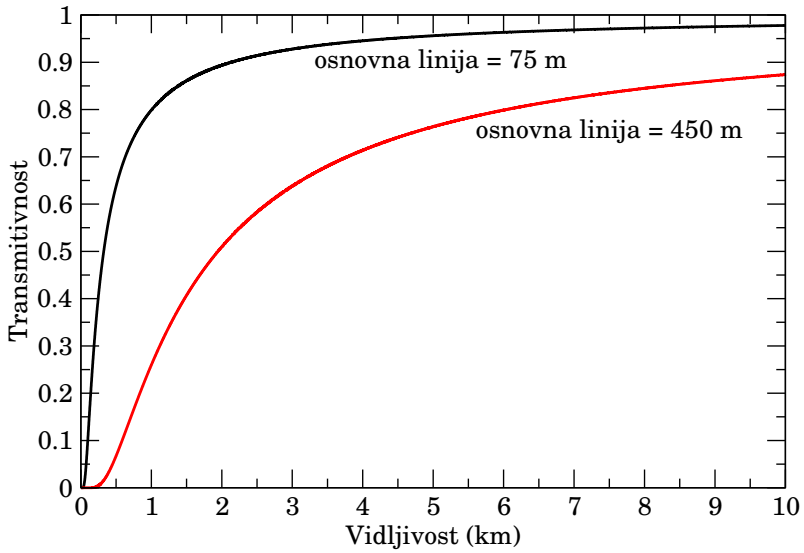
10.2 Merenje meteorološkog optičkog rastojanja

Instrumenti za merenje MOR-a mere ili ekstinkciju svetlosti ili količinu rasute svetlosti. Instrumenti kojim se direktno meri ekstinkcija svetlosti duž poznatog puta su ***telefotometri***, ***optički merači ekstinkcije*** i ***transmisiometri***. Indirektan metod merenja MOR-a je merenje količine rasute svetlosti. Obično se meri svetlost rasuta unapred, van snopa.

10.2.1 Instrumentalno merenje ekstinkcije svetlosti

10.2.1.0.3 Telefotometri se koriste za merenje ekstinkcije u toku dana. Oni porede stvarnu osvetljenost udaljenog objekta sa osvetljenošću neba, ali se retko koriste za rutinska merenja, s obzirom da je poželjnije koristiti direktna vizuelna osmatranja. Oni mogu biti korisni za ekstrapolisanje MOR-a iza najudaljenijih objekata.

10.2.1.0.4 Optički merači ekstinkcije su veoma jednostavni instrumenti i koriste se za noćno merenje udaljene svetlosti. Imaju oblik graduisanog neutralnog filtera, koji redukuje svetlost u poznatoj meri i mogu da se podese tako da svetlost bude jedva vidljiva. Očitavanjem vrednosti dobija se mera transmitivnosti vazduha između izvora svetlosti i osmatrača. Ukupna tačnost zavisi uglavnom od promene osetljivosti oka i od fluktuacija intenziteta izvora svetlosti. Greška instrumenta je proporcionalna meteorološkom optičkom rastojanju.



Slika 10.1: Funkcija prenosa za transmisiometar.

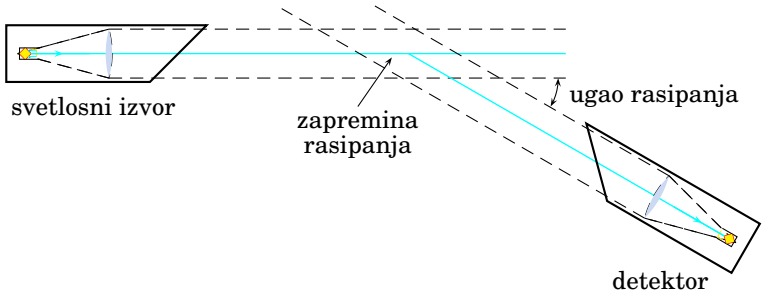
Prednost ovih instrumenata je da mogu meriti vidljivost u opsegu od 100 m do 5 km sa prihvatljivom preciznošću, koristeći samo tri dobro raspoređena izvora svetlosti. Van ovog opsega bi za postizanje iste tačnosti morali da koristimo više planski raspoređenih izvora svetlosti. Međutim, način korišćenja takvog instrumenta (određivanje tačke na kojoj svetlost nestaje i pojavljuje se) u velikoj meri utiče na tačnost i homogenost merenja.

10.2.1.0.5 Transmisiometar čine izvor svetlosti i jedan ili dva detektora svetlosti na poznatom rastojanju od izvora, obično 75 m i 450 m. Da bi se smanjila osetljivost od okolne svetlosti, izvor emituje vrlo intenzivne impulse svetlosti u trajanju od 0.1 μs, sa frekvencijom od 1.5 Hz. Detektori svetlosti su dizajnirani da prime svetlost samo iz pravca izvora. Transmisiometri se obično koriste na aerodromima i postavljaju se paralelno sa pistom. Ovaj instrument direktno meri E iz jednačine (10.1). E_o je intenzitet izvora, za koji se pretpostavlja da je konstantan. Rastojanje od izvora svetlosti do detektora (osnovna linija transmisiometra), x, je poznato, pa meteorološko optičko rastojanje računamo na osnovu jednačine (10.5).

PRIMER 10.1 *Pretpostavimo da je osnovna linija transmisiometra 450 m i da je količnik primljenog i emitovanog signala bio 0.72. Tada je vidljivost*

$$V = 450\frac{\ln 0.05}{\ln 0.72} = 4100\ m.$$

Sirovi (neobrađeni) izlaz iz senzora je transmitivnost, E/E_o, prikazan na slici 10.1. Zapazite da je osetljivost instrumenta mala za veoma kratke i veoma duge vidljive opsege. To opravdava upotrebu dva detektora i dužinu osnovne linije transmisiometra od 450 m. Transmisiometar sa osnovnom linijom od 75 m može da bude beskoristan za vidne opsege veće od nekoliko kilometara.



Slika 10.2: Merač unapred rasute svetlosti.

10.2.1.0.6 Merač unapred rasute svetlosti Svetlost se rasipa van snopa u svim pravcima na česticama koje smanjuju vidljivost. Vidljivost se može meriti posredno, tako što se meri unapred ili unazad (ka izvoru) rasuta svetlost. Problem sa merenjem rasutog zračenja je u tome što je intenzitet rasipanja u nekom pravcu funkcija količnika prečnika čestica i talasne dužine svetlosti. Talasna dužina je konstantna, jer se koristi stalni izvor svetlosti, ali je veličina čestica veoma promenljiva, npr. čestice dima i magle. Pokazano je da je svetlost rasuta unapred (20° do 50°) manje zavisna od ovog količnika.

Merač unapred rasute svetlosti, prikazan na slici 10.2 ima zapreminu uzorkovanja od 0.021 m^3 i njegov izvor svetlosti je ksenonski blic. Deklarisani vidljivi opseg je od 0.4 do 16 km. Tačnost merenja se smanjuje sa povećanjem vidljivosti, 0.4 km pri maloj i 0.8 km za vidljivost od oko 4 km. Merač unapred rasute svetlosti mora da bude kalibrisan pomoću transmisiometra. Vidljivost se računa iz 30 izlaznih signala. Ovako dobijena vidljivost se osrednjava preko jednominutnih intervala. Srednja desetominutna vrednost vidljivosti se računa kao harmonijska sredina jednominutnih srednjih vrednosti

$$\overline{V} = \frac{N}{\sum_{n=1}^{N} \frac{1}{V_n}}, \tag{10.8}$$

V_n su jednominutne srednje vrednosti vidljivosti. Harmonijska sredina je pogodnija od aritmetičke sredine jer daje realnije vrednosti u slučaju naglog smanjenja vidljivosti i daje manje vrednosti.

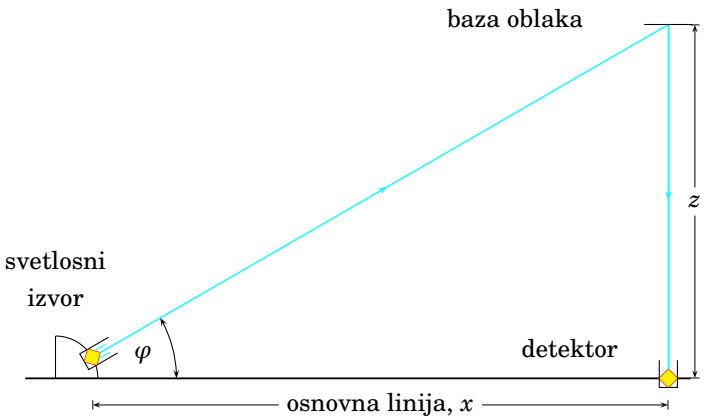
PRIMER 10.2 *Merač vidljivosti je izmerio 10 jednominutnih vrednosti. Njihova aritmetička sredina, u km, bi bila*

$$V_{Avg} = (3.2 + 3.1 + 3.1 + 2.9 + 3.3 + 3.2 + 2.8 + 2.3 + 1.8 + 1.3)/10 = 2.7\ km.$$

Podaci pokazuju da vidljivost opada u većem delu desetominutnog intervala, i da ovo opadanje ima mali uticaj na srednju desetominutnu vrednost. Harmonijska srednja vrednost istih podataka je

$$V_{Har} = \frac{10}{\frac{1}{3.2} + \frac{1}{3.1} + \frac{1}{3.1} + \frac{1}{2.9} + \frac{1}{3.3} + \frac{1}{3.2} + \frac{1}{2.8} + \frac{1}{2.3} + \frac{1}{1.8} + \frac{1}{1.3}} = 2.5\ km$$

i bitno je manja.



Slika 10.3: Silometar sa rotacionim izvorom ili rotacionim detektorom svetlosti.

Vidljivost koju izmeri osmatrač je karakteristika celog vidljivog opsega. Merač unapred rasute svetlosti integriše duž svega nekoliko centimetara, tako da postoji suštinska razlika između ova dva merenja. Signali dobijeni meračem rasipanja se integrale u vremenu da bi se kompenzovala mala dužina merne putanje. Integracije po vremenu nisu uvek uporedive sa integracijom po rastojanju, posebno kada postoje izolovani pramenovi magle.

10.3 Merenje visine oblaka

Osmatrači procenjuju visinu oblaka posmatranjem celog neba, a instrumenti mere visinu oblaka iznad jedne tačke. Instrumentalne tehnike koriste osrednjavanje po vremenu, umesto prostornog osrednjavanja koje vrše osmatrači, radi detektovanja postojanja više oblačnih slojeva i radi procene dela neba pokrivenog oblacima. Instrumenti za merenje visine oblaka se zovu ***silometri***. U sadašnje vreme se koriste rotacioni i laserski silometri.

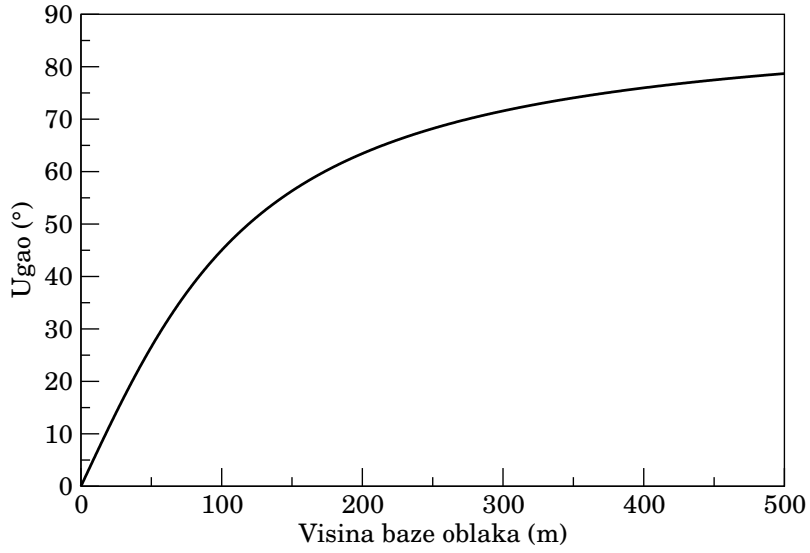
10.3.1 Rotacioni silometar

Rotacioni silometar se sastoji od jakog izvora usmerene svetlosti koji rotira od skoro horizontalnog položaja do vertikalnog. Drugi tip je silometar sa rotirajućim prijemnikom, kod koga je svetlosni snop usmeren vertikalno, a prijemnik rotira. U obe varijante visina oblaka je

$$z = x \operatorname{tg} \varphi$$

x je horizontalno rastojanje između izvora i detektora svetlosti i φ je elevacioni ugao. Rotacioni silometar je prikazan na slici 10.3. Kod silometra kod koga izvor svetlosti rotira detektor je usmeren vertikalno uvis, a kod rotirajućeg detektora izvor svetlosti je nepokretan i usmeren uvis.

Funkcija transfera rotacionog silometra, sa osnovnom linijom (rastojanje između izvora i detektora svetlosti) od 100 m prikazana je na slici 10.4. Kao što



Slika 10.4: Funkcija prenosa rotacionog silometra sa osnovnom linijom od 100 m.

se može videti sa slike osetljivost silometra se smanjuje sa povećanjem visine oblaka.

10.3.2 Laserski silometar

Laserski silometri emituju vertikalno uvis impulse laserske svetlosti i mere vreme koje protekne do registrovanja povratnog signala. Na osnovu izmerenog vremena visina oblaka se računa kao

$$z = \frac{ct}{2},$$

c je brzina svetlosti i t je vreme za koje emitovani impuls pređe put do oblaka i nazad, posle reflektovanja, do prijemnika. Opseg merenja laserskim silometrom je određen frekvencijom ponavljanja impulsa ili atmosferskim slabljenjem impulsa i osetljivošću prijemnika. Kako se impuls svetlosti kreće uvis, on se širi, pa je snaga koju primi tačkasta meta proporcionalna z^{-2}. Svetlost koja se od mete rasipa ka prijemniku se širi na isti način, pa je snaga primljenog signala proporcionalna z^{-4}. Ako je snop silometra kompletno popunjen česticama oblaka, što je razumna pretpostavka za malu širinu snopa, tada je površina poprečnog preseka mete proporcionalna z^2, pa je snaga impulsa reflektovane svetlosti koja dođe do prijemnika proporcionalna z^{-2}.

PRIMER 10.3 *Neka laserski silometar ima merni opseg od* 7.5 km*, podeljen na 500 binova i širinu snopa od* 5 mrad*. Za koje vreme impuls svetlosti dođe od predajnika do vrha mernog opsega? Koliki je prečnik snopa na vrhu mernog opsega?*

rešenje: *Kako se signal kreće brzinom svetlosti, put od predajnika do vrha mernog opsega pređe za vreme*

$$t = \frac{z}{c} = \frac{7.5 \times 10^3 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}} = 2.5 \ \mu\text{s}.$$

Prečnik snopa na vrhu opsega je

$$d = 2z \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = 2 \times 7.5 \times 10^3 \text{ m} \times \sin(2.5 \times 10^{-3}) = 37.5 \text{ m}.$$

Padavinske čestice slabe i zračenje na gore i zračenje reflektovano od oblaka. Zbog toga baza oblaka može da bude potpuno nevidljiva.

Glava 11

Visinska merenja

Povećanjem visine iznad površine Zemlje komplikuju se merenja atmosferskih veličina. Za prenos instrumenata za merenje atmosferskih veličina na visinu upotrebljavani su baloni, zatim vazduhoplovi i rakete. Sada se za osmatranje atmosfere koriste daljinski senzori koji se mogu nalaziti na površini Zemlje ili na satelitima. U tom kontekstu, visinska merenja su merenja u celoj troposferi iznad otprilike prvih sto metara i, u nekim slučajevima, u stratosferi.

Postoje brojne neodređenosti u vezi sa daljinskim merenjem, tako da su, radi provere daljinskih merenja, neophodni senzori koji se nalaze u sredini čije se karakteristike mere (*eng. in-situ sensors*). Dodatno, oprema koja se nosi balonom je relativno jeftina. Međutim, treba primetiti da je cena stvar perspektive; satelit sa instrumentacijom, stanica na tlu itd. mogu da budu ekonomični kada treba izvršiti merenja u kompletnoj atmosferi sa dobrom prostornom i vremenskom rezolucijom, na primer za potrebe sinoptičke meteorologije.

11.1 Metodi za izvođenje visinskih merenja

Visinska merenja pritiska, temperature, vodene pare i vetra mogu se vršiti uz pomoć instrumenata koji se prenose u sredinu čije se karakteristike mere (pomoću balona, raketa i vazduhoplova) i pomoću daljinskih senzora. Daljinski senzori se mogu klasifikovati kao aktivni (koji emituju energiju, kao što su radar i lidar) ili pasivni (koji samo primaju energiju, kao što su mikrotalasni radiometri), i da li su usmereni na gore od tla ili na dole sa satelita. Senzori na daljinu su prikazani ukratko pre razmatranja in-situ instrumenata.

11.1.1 Daljinska merenja

Profili temperature, vlažnosti, gustine itd. mogu da se procene sa satelita upotrebom višestrukih uskopojasnih radiometara. To su pasivni senzori koji mere zračenje koje dolazi iz atmosfere. Na primer, profili temperature se mogu proceniti sa satelita merenjem infracrvenog zračenja koje u atmosferi emituju CO_2 (trake oko 5000 μm) i O_2 (trake oko 3.4 μm i 15 μm). Vetar može da se proceni na osnovu kretanja oblaka ili korišćenjem Doplerovog efekta koji se javlja zbog toga što su neke komponente atmosfere nošene vetrom. Aktivni senzor (ra-

Slika 11.1: Radarski profajler vetra RWP/RASS.

dar) se koristi za procenu padavina i, ako je u pitanju Doplerov radar, za merenje polje vetra i klasifikaciju hidrometeora.

Velika prednost instrumenata koji se nalaze na satelitu je da oni mogu pokriti celu Zemlju sa odličnom prostornom rezolucijom. Vremenska rezolucija može biti dobra zavisno od toga koliko se satelita i koliko orbita koristi. Tipično, ograničavajući faktor je vertikalna rezolucija.

Svi GPS sateliti emituju radio-signale koje koriste prijemnici na tlu za određivanje svog položaja. Jedan od izvora greške u određivanju položaja je zadržavanje prolaza signala prouzrokovano vodenom parom u atmosferi, koja povećava indeks refrakcije. Ovo kašnjenje signala, koje je problem za određivanje pozicije, može se meriti za potrebe dobijanja padavinske vodene pare (to je visina stuba vode jediničnog poprečnog preseka koja bi se dobila ako bi sva vodene para u određenom stubu atmosfere bila kondenzovana u tečnost).

Profajler vetra (*eng. wind profiler*) je visoko specijalizovani Dopler radar dizajniran da meri vertikalne profile vetra. To su radari vedrog vremena, relativno male snage i visoke osetljivosti. Oni rade na talasnim dužinama od 33 cm do 6 m (većina konvencionalnih meteoroloških radara radi na talasnoj dužini 10 cm). On detektuje fluktuacije gustine atmosfere, koje se koriste kao indikator srednjeg vetra. Njihove antene su mehanički fiksirane, usmerene su pravo uvis, ali mogu biti elektronski orijentisane za nekoliko stepeni (10 do 15) od vertikale u najmanje dva pravca (N i E). Profajler vetra talasne dužine 74 cm obezbeđuje časovno osrednjene profile vetra do visine od 16 km. On meri vetar skoro direktno iznad svakog mesta. Vremenska rezolucija je veoma dobra, a prostorna rezolucija je ograničena brojem i položajem mernih mesta. Profajleri vetra mogu biti dopunjeni sistemom RASS (*eng. radio acustic sounding system*) i tada mogu meriti profile virtuelne temperature. Četiri vertikalno usmerena predajnika zvuka, po jedan na svakoj strani antene profajlera, emituju zvučne talase različitih frekvencija. Profajler vetra može da detektuje fluktuacije gustine prouzrokovane zvučnim talasima i dobija maksimalni povratni signal kada je akustična talasna dužina jednaka polovini radarske talasne dužine. Kako je frekvencija zvuka u tom trenutku poznata, može biti određena brzina zvuka. Iz tog merenja se može

izračunati virtuelna temperatura jer je proporcionalna kvadratu brzine zvuka. Profil virtuelne temperature se može meriti rutinski do 4 km, ponekad do 7 km.

Radarski profajler vetra i radio akustični sondažni sistem (RWP/RASS), prikazan je na slici 11.1. Ovaj sistem emituje elektromagnetno zračenje frekvencije 915 MHz i može da meri profile vetra i snagu unazad rasutog signala na visinama od 0.1 km do 5 km i profile virtuelne temperature na visinama od 0.1 km do 2.5 km. Radi tako što emituje elektromagnetnu energiju u atmosferu i meri snagu i frekvenciju unazad rasutog zračenja. Virtualna temperatura se procenjuje tako što se emituje zvučni signal vertikalno i meri elektromagnetna energija koja se rasipa od zvučnog talasnog fronta. S obzirom na to da je brzina zvučnog talasa proporcionalna kvadratnom korenu virtuelne temperature vazduha, virtuelna temperatura može da se proceni merenjem Doplerovog pomaka rasutog elektromagnetnog talasa.

11.1.2 In-situ platforme

Vazduhoplovi opremljeni instrumentima mogu da vrše merenja duž trajektorije leta. Istraživački vazduhoplovi vrše specijalizovana merenja u okviru istraživačkih programa, ali nisu raspoloživi za uobičajena merenja. Rakete takođe mogu da se koriste za prenos instrumenata do velikih visina. Neke bespilotne letelice mogu da lete iznad tropopauze u toku duzeg perioda (49 do 72 sata) po umerenoj ceni.

Komercijalni avioni su opremljeni jednostavnim instrumentima za merenje pritiska, temperature i vlažnosti duž standardnih ruta. Podaci se prenose putem satelitskih komunikacionih linkova. Posebno su korisna merenja u toku prekookeanskih letova. Nedostaci ovih merenja su: ne dobijaju se vertikalni profili merenih veličina, podaci se mogu dobiti samo duž standardnih komercijalnih putanja, aviokompanije određuju raspored (vreme) letova.

Običan meteorološki balon može da se prati radarom ili teodolitom (videti stranu 196) radi dobijanja podataka o vetru duž putanje balona. Kada je balon opremljen instrumentalnim paketom ili sondom, on može dodatno da meri pritisak, temperaturu i vlažnost. Tehnologija balona se menja veoma sporo, a tehnologija sondi se rapidno popravlja i uključuje moderne senzore i GPS prijemnike za navigaciju. I pored napretka senzora za merenje na daljinu, postoji stalna potreba za sondažnim merenjima. Merenja pomoću sondi koje se prenose balonima je najeftiniji način in-situ merenja. Osnovni nedostaci takvih merenja su loša vremenska (tipično jedno ili dva sondiranja dnevno) i prostorna rezolucija.

Postoje specijalne sonde kojima se mere još neke atmosferske veličine, kao što su koncentracija ozona ili električno polje. Postoje sonde koje padaju iz aviona, takozvane ***padajuće ili drop sonde*** i njihova brzina padanja se kontroliše padobranom.

11.2 Meteorološki baloni

Meteorološki baloni se odlikuju veličinom, bojom i rastegljivošću. Zapremina balona raste pri podizanju balona sve do dostizanja visine pucanja. Rastegljivi

Tabela 11.1: Karakteristike nekih meteoroloških balona.

Masa (g)	Zapremina (m^3)	Visina pucanja (km)	Prečnik pucanja (m)
10	0.05	7.0	0.6
30	0.14	12.5	1.02
100	0.21	15.0	1.33
300	1.9	21.0	3.9
1000	3.5	30.5	7.7
3000	5.3	39.0	13.5

baloni se prave od prirodnog kaučuka ili veštačke gume od polihloroprena. Prirodna guma bolje održava oblik, manje se menja pri promeni temperature, osetljivija je na ozon i ultraljubičasto zračenje na velikim visinama i ima kraći životni vek u odnosu na polihloropren koji je jači. Nerastegljivi baloni se ne šire. Obično su napravljeni od polietilena. Oni se podižu sve dok se sila potiska ne izjednači sa težinom balona i tereta koji balon nosi i tada se zadržavaju na konstantnoj visini. To su baloni konstantne visine. Boja balona je važna samo kada se njegov položaj određuje vizuelno. Svetlija boja je pogodnija po vedrom, sunčanom, a tamna po oblačnom vremenu.

Pilot baloni se prate vizuelno radi određivanja horizontalnog vetra. Oni ne nose instrumente, tako da su manji i imaju masu od 10 do 100 g. Sondažni baloni mogu da nose dodatni teret i oni su veći, sa masom od 600 do 1800 g. Još veći baloni se koriste za nošenje specijalnih tereta. Karakteristike nekih balona su prikazane u tabeli 11.1.

Baloni se pune vodonikom ili helijumom. Helijum je inertan gas, tako da ne postoji opasnost od eksplozije ili požara pri radu sa njim, ali je relativno redak i ima nešto veću gustinu od vodonika. Vodonik je lako dostupan i jednostavno se dobija, ali može da bude veoma eksplozivan. Brzina podizanja je funkcija visine na kojoj se balon nalazi, mase balona i mase nošenog tereta. Ukupna sila potiska koja deluje na balon je

$$F_T = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho - \rho_B) g, \tag{11.1}$$

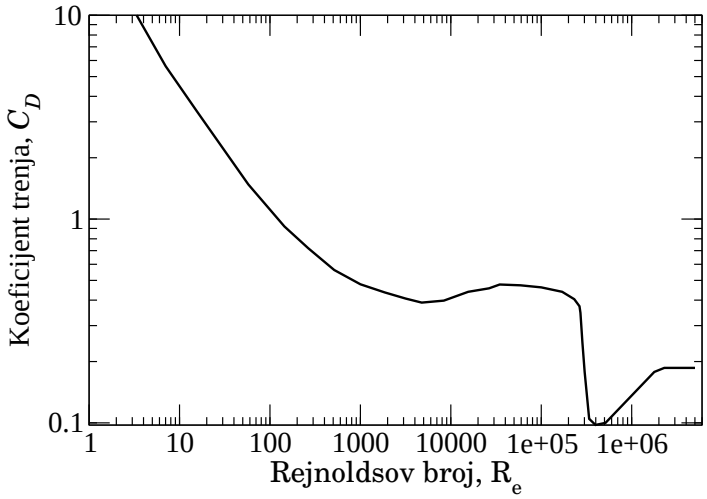
D je prečnik balona, ρ gustina vazduha, ρ_B gustina gasa u balonu i g je ubrzanje sile zemljine teže. Slobodna sila potiska je ukupna sila potiska umanjena za težinu balona i tereta

$$F_L = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho - \rho_B) g - (m_B + m_P) g, \tag{11.2}$$

m_B je masa balona i m_P je masa tereta. Sila trenja kojom vazduh deluje na balon koji se podiže je

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A w_B^2, \tag{11.3}$$

C_D je koeficijent trenja i funkcija je Rejnoldsovog broja ($\mathrm{R_e} = \frac{w_B \rho D}{\mu}$, μ je dinamička viskoznost), $A = \frac{\pi D^2}{4}$ je površina poprečnog preseka balona i w_B je vertikalna brzina balona.



Slika 11.2: Koeficijent trenja za sferu u funkciji Rejnoldsovog broja.

Ako je poznata visina na kojoj se nalazi balon, gustina i dinamička viskoznost mogu da se izračunaju iz osmotrenih podataka ili iz standardne atmosfere. Tada može da se izračuna Rejnoldsov broj, i da se sa slike 11.2 proceni koeficijent trenja. Stacionarno uzdizanje se uspostavlja kada se izjednače slobodna sila potiska i sila trenja, $F_L = F_D$. Brzina podizanja balona je u tom slučaju

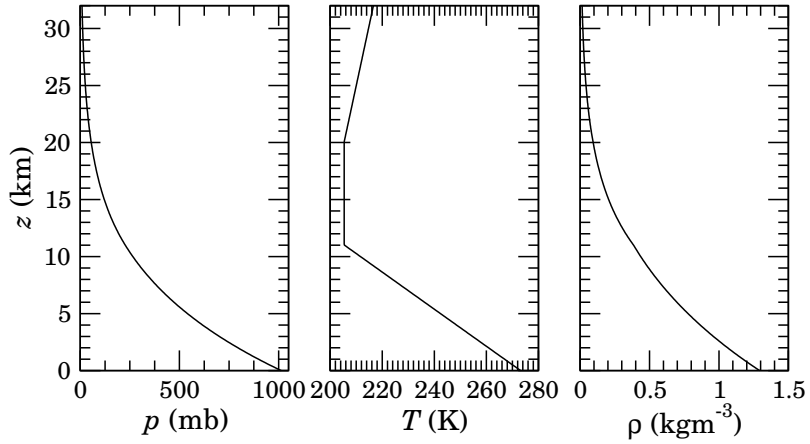
$$w_B = \sqrt{\frac{\pi D^3(\rho - \rho_B)g/6 - (m_B + m_P)g}{C_D \rho \pi D^2/8}}. \tag{11.4}$$

Na standardnoj temperaturi i pritisku ($T = 273.15$ K, $p = 1013.25$ mb), gustina vazduha je $\rho_o = 1.293\,\mathrm{kgm}^{-3}$, gustina vodonika $\rho_{Ho} = 0.0901\,\mathrm{kgm}^{-3}$ i gustina helijuma $\rho_{H_e o} = 0.1785\,\mathrm{kgm}^{-3}$. Indeks $_o$ označava standardne uslove.

Da bi izračunali vertikalnu brzinu u toku podizanja balona, moramo uzeti u obzir promenu veličina sa visinom. Sa promenom gustine vazduha, menjaće se gustina gasa u balonu, prečnik balona i zapremina. Sa promenom brzine i prečnika menja se i koeficijent trenja. U prvoj aproksimaciji, možemo pretpostaviti da će zapremina balona biti inverzno proporcionalna gustini, $V_B \rho = V_{Bo} \rho_o$. Ova relacija će biti u važnosti do visine pucanja. Gustina gasa u balonu je $\rho_B \rho_o = \rho \rho_{Bo}$. Ako je poznata gustina vazduha, eventualno iz standardne atmosfere, brzina uzdizanja balona se može izračunati iz sledećih izraza

$$\left.\begin{aligned} \rho_B &= \rho_{Bo}\frac{\rho}{\rho_o} \\ D &= D_o\left(\frac{\rho_o}{\rho}\right)^{1/3} \\ w_B &= \sqrt{\frac{\pi D^3(\rho - \rho_B)g/6 - (m_B + m_P)g}{C_D \rho \pi D^2/8}} \end{aligned}\right\}. \tag{11.5}$$

Ovo izračunavanje zahteva neke pretpostavke u vezi sa koeficijentom trenja. Obično, pogodna vrednost za koeficijent trenja je $C_D = 0.4$, ali kada se baloni ponekad nađu u prelaznom regionu ($R_e > 3 \times 10^5$) koeficijent trenja brzo opada.



Slika 11.3: Profili pritiska, temperature i gustine sa visinom u US standardnoj atmosferi.

Profili pritiska, temperature i gustine u standardnoj atmosferi su prikazani na slici 11.3. Prečnik i brzina podizanja, za balon mase 200 g sa teretom od 190 g, su prikazani na slici 11.4. Prikazane su brzine podizanja za balone napunjene vodonikom, w_{BH}, i helijumom, w_{BHe}.

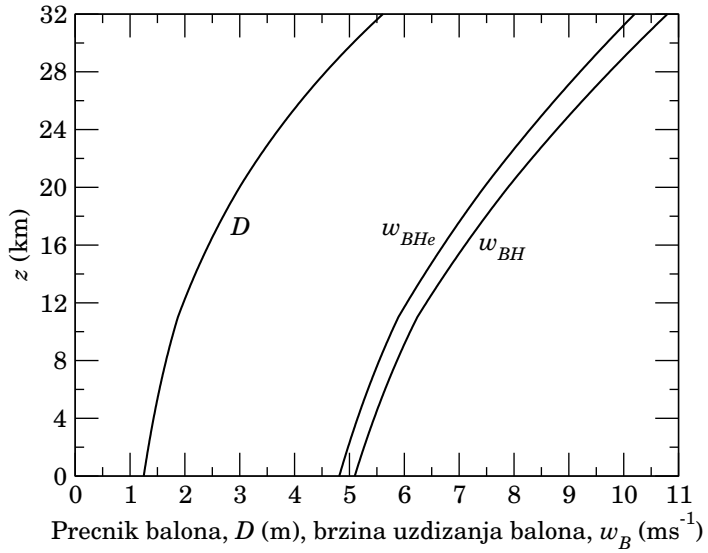
Vertikalna brzina odstupa od ovog modela zbog sledećih razloga:

- Materijal od koga je balon izrađen nije perfektno elastičan, tako da njegova zapremina neće biti inverzno proporcionalna gustini vazduha, kako je pretpostavljeno. Na nekoj visini balon će da prestane da se isteže i eventualno će da eksplodira.
- Vodonik (ili helijum) će da cure kroz balon.
- Kako balon dolazi u hladniji vazduh, zbog termalne inercije gas u balonu može da bude topliji od okolnog vazduha.
- Balon nije uvek sfernog oblika. Promena oblika će izazvati promenu veze prečnik-zapremina i koeficijenta trenja.
- Vertikalna komponenta vetra će se superponirati na brzinu uzdizanja balona.
- Za uzdizanje prikazano na slici 11.4, pretpostavljeno je da je koeficijent trenja konstantan ($C_D = 0.4$). Koeficijent trenja se menja pri promeni proizvoda $w_B \rho D$ (promene dinamičke viskoznosti su male).

Početna brzina podizanja balona je tipično između 5 i 6 ms^{-1} i obično je približno konstantna sa visinom.

11.3 Merenje vetra na visini

Sistemi za daljinsko merenje vetra mere kretanje atmosfere na osnovu rasipanja elektromagnetnog zračenja ili zvuka od jednog ili više ciljeva: hidrometeora, prašine, aerosola ili na nehomogenostima indeksa refrakcije (prelamanja)



Slika 11.4: Prečnik i vertikalne brzine balona punjenog vodonikom, w_{BH} i helijumom, w_{BHe}, pri njegovom podizanju u standardnoj atmosferi.

koje su prouzrokovane atmosferskom turbulencijom malih razmera ili na samim molekulima.

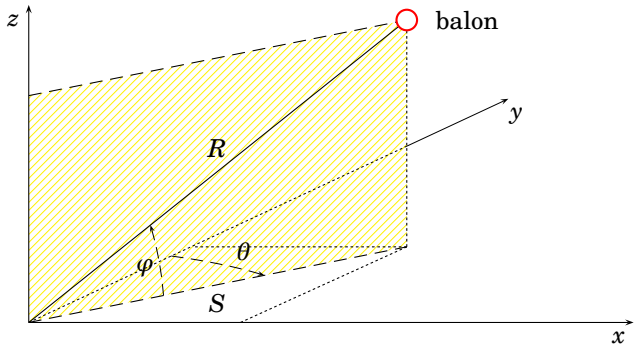
Za direktno merenje vetra na visini se koriste ciljevi čiji se položaj može kontinuarno pratiti. Za njihovo praćenje se u meteorološkoj praksi koriste dve vrste metoda: praćenje pomoću usmerenih antena i praćenje pomoću radio-navigacionih sistema.

Sistemima na Zemlji se meri azimutni ugao i dve od sledećih veličina: elevacioni ugao, pravolinijsko rastojane i visina. Merenje se vrši pomoću radara koji prati reflektor povezan sa balonom, pomoću radio-teodolita ili sekundarnog radara koji prate radio-sondu nošenu balonom ili teodolitom koji prati balon. Radar i radio-teodolit obično imaju tačnost od oko 0.1° za azimutni i elevacioni ugao. Radar meri rastojanje sa greškom koja je obično manja od 30 m. U situacijama kada je elevacioni ugao balona iznad 10 do 15° za merenje vetra na visini najpodesniji su moderni radio-teodoliti sa antenom manjom od 2 m. Primarni radari mogu zadovoljiti vrlo visoke zahteve u pogledu tačnosti za vetar na visini u svim uslovima.

Radio-sonda koja može da prima signale od sistema radio-navigacionih predajnika je prikačena za cilj koji se prati (ili za balon koji se podiže ili za padobran drop sonde). Promene u fazi (zbog Doplerovog efekta) ili u vremenu prispeća radio-navigacionih signala primljenih na radio-sondi su korišćeni za računanje horizontalnog kretanja cilja.

Horizontalna komponenta brzine vetra može da se odredi praćenjem balona. Balon bez instrumenata se zove pilot balon. On se može pratiti pomoću jednog teodolita, dva teodolita ili pomoću radara. Ako balon nosi instrumente, postoje dodatni načini za njegovo praćenje, na primer pomoću radio-teodolita ili korišćenjem navigacionih sredstava.

Kako baloni imaju veliku površinu i malu masu, oni obično prate srednji tok



Slika 11.5: Geometrija pojedinačnog teodolita. φ je elevacioni, θ azimutni ugao, R je koso rastojanje od teodolita do balona i S je projekcija kosog rastojanja na horizontalnu ravan.

vetra. I kada nose instrumente oni prate srednji tok vetra, jer instrumentalni paket ima malu površinu u odnosu na balon.

Sila kojom vetar deluje na balon je

$$F = m_B \frac{dV_B}{dt} = C_D \rho A (V - V_B)^2, \tag{11.6}$$

m_B je masa balona, V horizontalna komponenta brzine vetra, V_B horizontalna komponenta brzine balona, C_D koeficijent trenja balona u vazduhu, ρ gustina vazduha i A je površina poprečnog preseka balona.

Ako pretpostavimo da je brzina balona aproksimativno jednaka brzini vetra, jednačinu (11.6) možemo pojednostaviti do

$$\tau \frac{dV_B}{dt} + V_B = V, \tag{11.7}$$

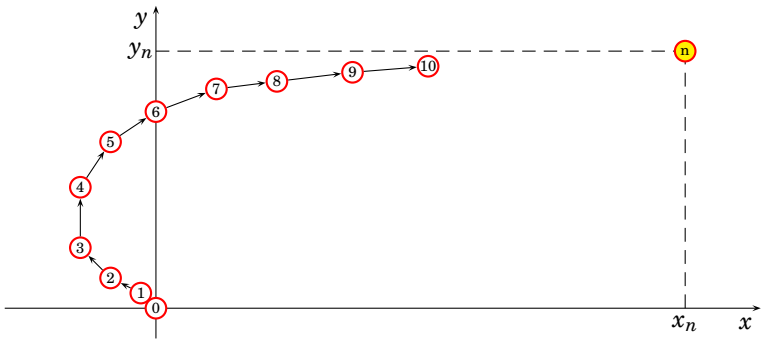
gde je vremenska konstanta τ jednaka

$$\tau = \frac{m_B}{C_D \rho A V} \tag{11.8}$$

i obrnuto je proporcionalna brzini vetra. Masa balona, m_B, je mala, a površina poprečnog preseka, A, velika. Odavde sledi da se brzina balona brzo menja pri promeni vetra. Zbog toga je pretpostavka da balon prati vetar potpuno opravdana.

11.3.1 Teodoliti

Pilot balon može da se prati vizuelno pomoću jednog teodolita. Teodolit je optički uređaj kojim se mere azimutni i elevacioni uglovi sa velikom preciznošću. Ako je poznata brzina uzdizanja balona, može se odrediti položaj balona i iz uzastopnih položaja balona izračunati brzina vetra. Sa dva teodolita položaj balona može da se odredi mnogo preciznije. Ovaj metod je ograničen na vizuelni opseg i ne može se primeniti kada postoji oblačni pokrivač. Na slici 11.5 je prikazana geometrija u slučaju merenja jednim teodolitom. R je koso pravolinijsko



Slika 11.6: Određivanje horizontalne brzine vetra na osnovu položaja balona u pravilnim intervalima vremena.

rastojanje od teodolita do balona, S je rastojanje od teodolita do balona duž površine Zemlje, φ je elevacioni ugao, θ je azimutni ugao u odnosu na sever, x i y su horizontalne koordinate balona u odnosu na teodolit.

Procedura za određivanje horizontalne brzine vetra sastoji se u vizuelnom praćenju balona i određivanju uglova φ i θ u jednominutnim intervalima vremena. Visina balona z može da se odredi iz poznate (pretpostavljene) brzine podizanja. Iz izraza sa slike 11.5, rešavanjem po x i y dobijamo

$$\begin{aligned} x &= z\,\mathrm{ctg}\,\varphi \sin\theta \\ y &= z\,\mathrm{ctg}\,\varphi \cos\theta. \end{aligned} \tag{11.9}$$

Ako se merenja vrše u jednominutnim intervalima, u i v komponente horizontalnog vektora vetra su

$$\begin{aligned} u &= \frac{x_n - x_{n-1}}{60}, \\ v &= \frac{y_n - y_{n-1}}{60}. \end{aligned} \tag{11.10}$$

indeksima n i $n-1$ su označeni odgovarajući jednominutni intervali.

Na slici 11.6 prikazan je način određivanja horizontalne brzine vetra na osnovu položaja balona u uzastopnim pravilnim intervalima vremena.

Sa balonom koji nosi radio-sondu, koja je opremljena instrumentalnim paketom za emitovanje izmerenih podataka prema Zemlji, položaj se može odrediti radio-teodolitom ili pomoću radio-kompasa, koji prate radio-signal emitovan sa radio-sonde. Uz informaciju o izmerenom pritisku, koja se dobija od sonde, može se odrediti tačan trodimenzionalni položaj sonde i izračunati trodimenzioni vektor vetra. Veličina antene radio-teodolita je obrnuto proporcionalna frekvenciji emitovanja sonde. Što je viša frekvencija potrebna je manja antena. Zbog toga radio-teodoliti rade najbolje sa visokofrekventnim sondama. Uobičajena frekvencija emitovanja radio-sondi je 1680 MHz.

11.3.2 Radar

Za razliku od praćenja cilja radio-teodolitom, kod praćenja radarom istovremeno se mere pravolinijsko rastojanje i elevacioni i azimutni ugao. Primarni

radar detektuje impulse ultrakratkih radio-talasa koji se reflektuju od pogodnog cilja koji se prenosi balonom.

Radarski sistemi za merenje vetra se sastoje, u većini slučajeva, od modulatora, radio-frekventnog oscilatora, antenskog sistema za nalaženje pravca, prijemnika i jedinice za obradu podataka koja šalje informacije o pravolinijskom rastojanju, azimutu i elevaciji kompjuteru na tlu. Kada je reflektor usmeren prema cilju koga nosi balon, impulsi se reflektuju unazad do istog antenskog sistema i konvertuju prijemnikom. Meri se interval vremena od emisije impulsa iz magnetrona do prijema reflektovanog signala od cilja vezanog za balon. Ovo vreme se konvertuje u rastojanje od radara do cilja. Pri tome se uzima u obzir kašnjenje signala izazvano elektronikom za detekciju. Radari koriste talasne dužine od oko 3, 5 i 10 cm. Za talasnu dužinu od 3 cm je moguće koristiti manju antenu, za željenu tačnost merenja rastojanja, i zbog toga jeftiniji radar. S druge strane slabljenje signala pri jakoj kiši je mnogo veće za talasnu dužinu od 3 cm nego za 10 cm. U oblastima u kojima su oubičajene jake kišne padavine, veća talasna dužina omogućava merenje pri svim vremenskim uslovima na svim rastojanjima.

11.3.2.1 Radarski reflektori

Najefikasniji oblik radarske mete za navedene talasne dužine je ugaoni reflektor. Njega čine tri međusobno normalne ploče koje su dobri električni provodnici. U jednom dizajnu, gornja ploča, koja je horizontalna pri letu balona, je kvadratnog oblika. Model koji se koristi za velika rastojanja je trosvodna konstrukcija koja pri letu može da rotira, čime se smanjuje mogućnost da se dugo održava slaba radarska refleksivnost u pravcu radara. Masa i trenje reflektora u toku leta trebalo bi da budu najmanje mogući. Radarski reflektor mora da bude lako sklopljiv, zbog lakšeg skladištenja i transporta.

Energija radarskog snopa koja dođe do reflektora je proporcionalna kvadratu linearne dimenzije reflektora. Prema radarskoj teoriji, količnik primljene i emitovane energije je direktno proporcionalan kvadratu dužine reflektora i obrnuto proporcionalan četvrtom stepenu pravolinijskog rastojanja od radara do reflektora. Korišćeni reflektor treba da bude dovoljno veliki da obezbedi tačno praćenje do najvećeg dometa radara pri očekivanim meteorološkim uslovima. Kada je strujanje na visini slabo, mogu se koristiti manji i jeftiniji reflektori.

U manjoj meri karakteristike ugaonih reflektora zavise i od talasne dužine zračenja. Radari koji emituju kraće talasne dužine (3 cm) dobijaju više energije od date mete, i zbog toga mogu emitovati manje snage. Sa druge strane prigušenje zračenja i potapanje mete u slučaju kišnih padavina su više izraženi kod kratkih talasnih dužina.

Ugaoni reflektori od 0.5 do 1m dužine su pogodni za većinu primena. Kod njih je dužina u stvari dužina spoljašnje strane (hipotenuza) trouglova koji čine reflektor. Za pravljenje provodnih ploča se obično koristi metalna folija nalepljena na papiru ili polistirenu, metalizirana mreža sa veličinim otvora oko 0.5 cm ili metalizirani boPET* film. Ove ploče treba da budu dobri električni pro-

*Biaxially-oriented polyethylene terephthalate (boPET) - dvoosno orijentisani polietilentereftalat.

vodnici. Ako je otpor između dve tačke na ploči na rastojanju od 30 cm manji od 20 Ω smatra se da je ploča dobar provodnik. Kada je reflektor sklopljen ploče treba da budu ravne do unutar 0.6 cm i da su međusobno normalne do unutar 1°.

11.3.2.2 Transponderski sistemi

U sekundarnim radarskim sistemima, impulse energije koje emituje radar na tlu prima responder sistem kojeg nosi balon. To može da bude ili poseban transponderski† paket ili transponder ugrađen u radio sondu. Frekvencija povratnog signala nije neophodno ista kao frekvencija signala koji emituje radar. Vreme koje protekne od momenta emitovanja impulsa do momenta prijema od respondera omogućava da se direktno izmeri pravolinijsko rastojanje.

Prednost ove tehnike u odnosu na primarni radar je da praćenje može da se vrši na većim rastojanjima za datu emitovanu snagu. Ovo je zbog toga što je energija koju emituje responder nezavisna i obično veća od energije koja se primi od emitera sa tla. Zbog toga je energija koju primi prijemnik na tlu inverzno proporcionalna kvadratu rastojanja od radarskog cilja. Kod primarnog radara ova energija je proporcionalna četvrtom stepenu rastojanja.

Međutim, ako je potrebno izvršiti veliki broj merenja vetra bez istovremenog vršenja radio-sondažnih merenja iznad neke lokacije, cena potrošnog materijala će biti veća kada se merenje izvodi sa sekundarnim nego sa primarnim radarom.

Kompleksnost sistema i zahtevi održavanja sekundarnih radara su obično između radio-teodolita i primarnih radara.

11.3.3 Uređaji za navigaciju

Kod navigacionih sistema za praćenje sonde, u radio-sondu je ugrađen antenski sistem koji prima signale od radio-navigacionog sistema. Primarni zadatak radio-navigacionih sistema je navigacija vazduhoplova i brodova, kao i navigacija za vojne potrebe. Za merenje vetra na visini sada su u upotrebi Loran sistemi koji koriste predajnike na tlu i GPS sistem sa predajnicima na satelitima.

Radi smanjivanja cene obrade signala, veći deo procesuiranja signala se izvrši po prenosu signala od sonde do stanice na tlu. Zbog toga je neophodno obezbediti dobar prijem od radio-sonde. Antenski sistem na zemlji mora da obezbedi dobru optičku vidljivost u svim pravcima. Frekvencija radio-sonde mora da osigura da pogrešna modulacija osnovne frekvencije radio-sonde navigacionim signalom ne dovede do prekida osnovne frekvencije koja se emituje od sonde do stanice.

Tačnost merenja vetra na visini postignuta pomoću navigacionih sredstava se menja sa promenom geografske lokacije i korišćenog navigacionog signala. GPS merenja vetra su tačnija od većine drugih sistema. U tabeli (11.2) su prikazane aproksimativne greške pri određivanju brzine i visine pomoću različitih navigacionih uređaja. Navigacioni sistem OMEGA je bio prvi radio-navigacijski

†Transponder (skraćenica od **trans**mitter-res**ponder**) je automatski uređaj koji prima, pojačava i reemituje signal na frekvenciji koja je različita od primljene.

Tabela 11.2: Greške pri određivanju vektora vetra i visine navigacionim uređajima.

Navigacioni sistem	Brzina (ms^{-1})	Visina (m)
LORAN-C	0.7	150
OMEGA	1.5	300
GPS	0.1	30

sistem sa globalnom pokrivenošću. Radio je u vrlo niskom frekventnom opsegu. Ne koristi se od septembra 1997. godine.

Glavna prednost navigacionih sistema je jednostavnost sistema na tlu, koji ne sadrži pomerajuće delove i ne zahteva vrlo precizna podešavanja antena za praćenje. Zbog toga su ovi sistemi pogodni za korišćenje na vazduhoplovima, brodovima i na tlu.

11.3.3.1 Loran-C

Loran-C sistem je navigacioni sistem visoke tačnosti i radi u niskofrekventnom radio opsegu oko 100 kHz (talasna dužina oko 3 km). Njegova osnovna primena ja za pomorsku navigaciju. Ovaj sistem je u funkciji samo u određenim delovima Zemlje, uglavnom u priobalnim oblastima severne hemisfere.

Loran-C emisija se sastoji od grupe od osam ili devet impulsa noseće frekvencije 100 kHz. Trajanje svakog impulsa je $150\,\mu$s. Svaki lanac predajnika se sastoji od jedne vodeće (osnovne ili master) stanice i dve ili više pomoćnih. Usklađivanje u lancu predajnika se vrši u odnosu na osnovnu emisiju. Svaki pomoćni predajnik emituje grupu impulsa na fiksnom intervalu posle osnovnog, brzinom koja je karakteristična za svaki lanac. Tipično to je jedna emisija na svakih 100 ms.

Loran-C signali se prenose i kao talasi pri tlu i kao nebeski talasi reflektovani od jonosfere. Talasi pri tlu se prenose relativno stabilno. Postoje samo veoma male fazne korekcije u zavisnosti od toga da li se signali prenose preko kopna ili preko mora. Brzina promene fazne korekcije u toku podizanja radiosonde obično nije dovoljno velika da promeni tačnost merenja vetra. Prostiranje nebeskih talasa je promenljivije, zavisi od položaja jonosfere i menja se u toku dana. Signali talasa pri tlu su mnogo jači u odnosu na nebeske talase, ali je slabljenje nebeskih talasa značajno manje. Prema tome, najpovoljnija situacija za merenje vetra pomoću Loran-C navigacionog sistema je kada prevladavaju signali sa tla.

Loran-C radio-sonde primaju signale pomoću ugrađene antene i zatim modulišu noseću frekvenciju radio-sonde da bi prenele signale do prijemnika. Loran pratilac se koristi za detektovanje vremena dolaska Loran impulsa. Moderni Loran pratioci mogu da primaju istovremeno signale od više Loran lanaca. To im omogućava kvalitetno merenje vetra u velikom delu pokrivene oblasti. Vetar se računa iz brzina promene razlika vremena prispeća između parova Loran-C predajnika. Izračunavanja koriste sve pouzdane Loran-C signale koji su na raspolaganju, a ne samo minimalna tri.

11.3.3.2 Globalni sistem za pozicioniranje - GPS

GPS je radio-navigacioni sistem veoma visoke tačnosti. Zasnovan je na radio-signalima koji se emituju sa grupe od 32 satelita koji kruže oko Zemlje u šest orbitalnih ravni na visini 20200 km iznad Zemlje. Svaka orbitalna ravan je nagnuta za 55° u odnosu na ekvatorijalnu ravan, a međusobno su zarotirane u ekvatorijalnoj ravni za 60°. Orbitalni period satelita je 11 sati i 58 minuta. Sateliti su raspoređeni tako da se iznad horizonta bilo koje tačke na Zemlji, uvek nalaze najmanje četiri satelita.

Radio-sonde sa ugrađenim GPS prijemnikom emituju primljeni signal ka svojoj stanici na tlu, koja takođe prima GPS signal direktno sa satelita. Stanica na Zemlji računa svoj položaj pomoću GPS signala, određuje razliku između stvarnog i izračunatog položaja i izračunava poziciju radio-sonde.

11.3.3.2.1 Navigacioni signali Svaki GPS satelit emituje osnovni signal koji se dobija modulacijom nosećeg signala L1 i kombinacije dva digitalna signala. Digitalni signal niže frekvencije, sadrži navigacionu poruku i emituje se brzinom od 50 bita u sekundu. Navigacionu poruku čine sledeće informacije:

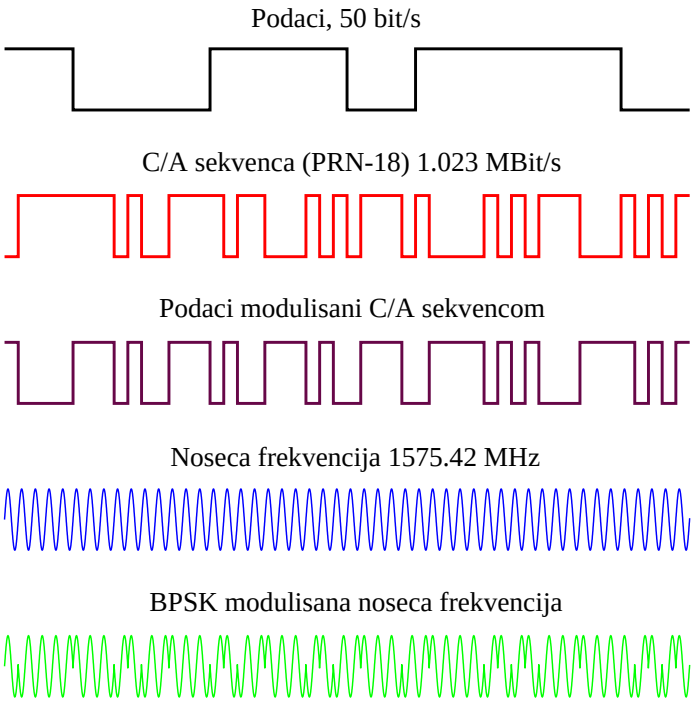
- satelitsko vreme i sinhronizacijski signali,
- precizni orbitalni podaci (efemeris[‡]),
- informacije o vremenskoj korekciji za određivanje tačnog satelitskog vremena,
- približni orbitalni podaci svih satelita (almanah),
- korekcioni signali za računanje vremena putovanja signala,
- podaci o jonosferi,
- informacije o operativnom statusu satelita.

Vreme potrebno za emitovanje svih ovih informacija je 12.5 minuta. Koristeći navigacionu poruku prijemnik može da odredi vreme emitovanja svakog satelitskog signala i tačan položaj satelita u vreme emitovanja.

Digitalni signal više frekvencije sadrži pseudoslučajni C/A kod. To je sekvenca sastavljena od pseudo-slučajnog šuma (Pseudo Random Noise (PRN)) od 1023 bita, koja se kontinualno emituje, a vreme emisije je 1 ms. Svaki satelit ima jedinstvenu sekvencu, javno objavljenu, po kojoj se može identifikovati na prijemniku. Ova sekvenca služi prijemniku za sledeće namene:

- identifikaciju: jedinstven oblik oznake identifikuje satelit sa koga je potekla i
- merenje vremena putovanja signala.

[‡]Efemeris (množina efemeride), od grčke reči *εφημεροζ* (efemeros), u značenju „dnevni“ - je tabela sa vrednostima koje daju položaj astronomskih objekata na nebu u datom vremenu.



Slika 11.7: Struktura podataka GPS signala.

Na svakom satelitu se nalaze po četiri veoma precizna atomska časovnika. Rezonantna frekvencija jednog od ovih časovnika generiše sledeće impulse vremena i frekvencije potrebne za operacije:

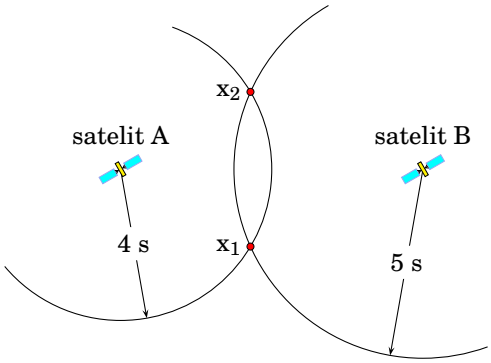
- impulse podataka frekvencije 50 Hz,
- C/A kod (emisija PRN koda na 1023 MHz), koji vrši modulaciju podataka koristeći operator isključivo ili[§] šireći podatke preko opsega širine 2MHz,
- civilne L1 noseće frekvencije (1575.42 MHz).

Podaci modulisani C/A kodom vrše modulaciju L1 noseće frekvencije pomoću dvofazne digitalne fazne modulacije (Binary-Phase-Shift-Keying (BPSK)4). Sa svakom promenom modulisanih podataka postoji promena od 180° u fazi noseće frekvencije. Struktura podataka GPS signala je prikazana na slici 11.7.

GPS sateliti emituju i P-kod koji je takođe pseudoslučajni kod, ali se njegova frekvencija i digitalna sekvenca razlikuju u odnosu na C/A kod. Njegova sekvenca se menja jedanput nedeljno. Ovaj signal se modulira nosećim signalom L2 (1227.6 MHz), koristi se za vojne potrebe, ne objavljuje se javno i dodatno se šifruje.

11.3.3.2.2 Izračunavanje položaja GPS prijemnici neprekidno primaju navigacione poruke koje sadrže informacije o položajima satelita. Prijemnik identifikuje signal sa svakog pojedinačnog satelita na osnovu njegove jedinstvene

[§]Isključivo ili je logička operacija između dva operanda koja ima vrednost tačno ako i samo ako jedan od operanada ima vrednost tačno (u fortranu **.neqv.**).

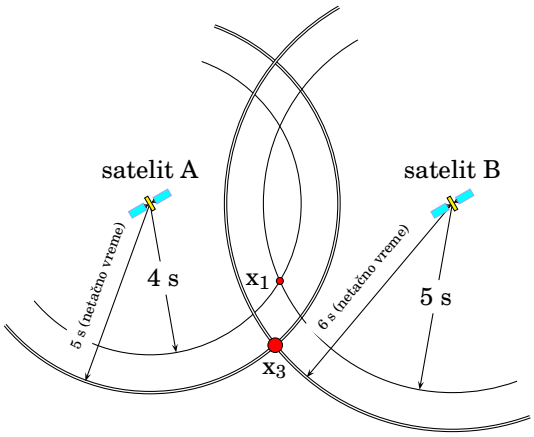


Slika 11.8: Šematski prikaz GPS navigacije u dve dimenzije u slučaju kada prijemnici imaju apsolutno tačne časovnike. Moguće lokacije su obeležene tačkama x_1 i x_2.

sekvence i meri vreme proteklo od emitovanja do prijema signala. Na osnovu vremena putovanja signala od satelita do prijemnika, s obzirom na to da je poznata brzina kojom radio-signal putuje, može se izračunati rastojanje od satelita do prijemnika. Ovo rastojanje se zove pseudorastojanje. Pseudo je zbog toga jer se pri računanju rastojanja pretpostavlja da je časovnik na prijemniku potpuno tačan. Atomski časovnici su veoma skupi (od 50 do 100 hiljada američkih dolara) i zbog toga se ne ugrađuju u GPS prijemnike, tako da se vreme koje pokazuje prijemnik malo razlikuje od tačnog vremena. GPS prijemnik u svakom trenutku može da izračuna pseudorastojanje od četiri satelita. Kada bi časovnici na prijemniku i satelitima bili potpuno sinhronizovani, sfere u čijim centrima su sateliti, sa poluprečnicima koji odgovaraju izračunatim rastojanjima, bi se sekle u jednoj tački, u prijemniku. Ako bi poluprečnici bili pseudorastojanja onda se sfere ne bi sekle u istoj tački, već bi bile pomerene duž odgovarajućih poluprečnika za isto rastojanje (razlika između tačnog i izmerenog vremena puta brzina signala). Malom korekcijom pseudorastojanja za istu vrednost sfere se mogu podesiti tako da se seku u jednoj tački. Kada se izračuna greška pseudorastojanja, onda se zna i nepreciznost časovnika GPS prijemnika, pa se on može podesiti da pokazuje tačno vreme. Takvo podešavanje se neprekidno izvodi.

PRIMER 11.1 *Koliko satelita bi bilo neophodno za tačno određivanje vašeg položaja, ukoliku su poznati tačni položaji satelita i rastojanja od njih?*

rešenje: *Ako znate tačan položaj satelita i tačno rastojanje r_1 od njega, tada će vaš položaj biti negde na sferi poluprečnika r_1 sa centrom na satelitu. U jednoj ravni, vaš položaj bi bio na kružnici istog poluprečnika. Ako znate položaj i rastojanje od drugog satelita r_2, vaš položaj u jednoj ravni bio bi u jednoj od dve tačke na preseku kružnica, kao što je prikazano na slici 11.8. Druga tačka se može odbaciti kao nerealna. U trodimenzionalnom prostoru bile bi vam potrebne informacije o položaju i rastojanju od trećeg satelita.*



Slika 11.9: Šematski prikaz GPS navigacije u dve dimenzije u slučaju kada prijemnici nemaju apsolutno tačne časovnike. Lokacija obeležena tačkom x_3 je netačna.

PRIMER 11.2 *Koliko satelita bi bilo neophodno za tačno određivanje vašeg položaja, ukoliko sat GPS prijemnika ima neko odstupanje od tačnog vremena?*

rešenje: *Posmatraćemo dvodimenzionalni primer prikazan na slici 11.9. Vremena putovanja signala sa satelita* A *i* B *su* 4 s *i* 5 s*, redom, a tačan položaj je* x_1*. Ako vreme GPS prijemnika kasni za 1 s u odnosu na tačno vreme, izmeriće vremena putovanja kao* 5 s *i* 6 s *i daće netačan položaj* x_3*. Ako koristimo samo dva satelita ne postoji način da znamo da je položaj netačan. Ako se koristi treći satelit* C*, sa vremenom putovanja signala od* 6 s*, koje GPS prijemnik meri kao* 7 s *imali bi situaciju kao na slici 11.10. Korekcijom rastojanja od satelita za istu vrednost kružnice se mogu podesiti tako da se seku u jednoj tački. U trodimenzionalnom prostoru za određivanj tačne lokacije bile bi potrebne informacije sa četiri satelita.*

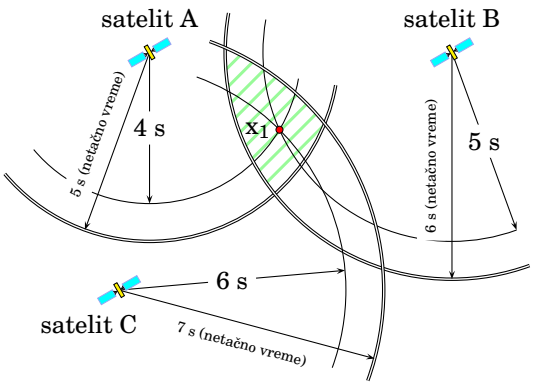
11.3.3.2.3 Preciznost i faktori koji unose grešku Za izračunavanje pozicije prijemnika potrebno je znati poziciju satelita i tačno vreme proteklo od emitovanja do prijema signala. Vreme se određuje tako što se porede signal sa satelita i interni signal prijemnika. Sadašnja elektronika u taj proces unosi nepreciznost od 10 ns[¶] u C/A kod, što odgovara grešci od 3 m.

Ostali izvori nepreciznosti su atmosferski efekti koji utiču na brzinu prostiranja radio-signala, višestruke putanje signala, nepreciznost satelitskih časovnika, nepreciznost podataka o položaju satelita i numeričke greške pri izračunavanju.

Vodena para u troposferi utiče na brzinu prostiranja radio-talasa, nezavisno od njihove frekvencije, što može da prouzrokuje grešku od 0.5 m. Uticaj jonosfere na prostiranje talasa je veći i unosi grešku do 5m.

Prostiranje radio-talasa kroz jonosferu zavisi od njihove frekvencije i od dužine pređenog puta. Ova nepreciznost može da se koriguje tako što se vrši prijem GPS signala na poznatoj poziciji na Zemlji i poredi pozicija dobijena obradom

[¶]Nanosekund (ns), 1 ns = 10^{-9} s.



Slika 11.10: Šematski prikaz GPS navigacije sa tri satelita u dve dimenzije u slučaju kada prijemnici nemaju apsolutno tačne časovnike.

GPS signala i stvarne pozicije. Na lokacijama u blizini tog stacionarnog prijemnika greška koju prouzrokuje jonosfera je približno ista i prijemnici u okolini mogu da izvrše korekciju ako im je poznata vrednost greške.

Zbog reflektovanja radio-signala od različitih prepreka prijemnik prima pored direktnog signala sa satelita i signale koji su reflektovani sa raznih površina, zgrada, orografskih prepreka i sl. Maksimalna greška izazvana na ovaj način je oko 1 m.

Atomski časovnici na GPS satelitima su veoma precizni, ali mogu imati mali pomak, što pri obradi podataka može da prouzrokuje grešku do 2 m. Stanice na Zemlji za praćenje i kontrolisanje satelita podešavaju i sinhronizuju ove časovnike.

Takođe, podaci o položaju satelita nisu potpuno tačni jer satelit vremenom može da odstupi od predviđene putanje. Nepreciznost u poziciji satelita dovodi do greške u poziciji prijemnika do 2.5 m.

Numeričke greške zavise od algoritama kojima se obrađuju signali, kao i od brzine procesora na prijemniku i unose grešku do 1m.

Kada se svi ovi faktori uzmu u obzir, ukupna greška određivanja pozicije je oko 15 m.

11.3.3.2.4 Diferencijalni GPS Jedna od tehnika za poboljšanje preciznosti (augmentaciju) je diferencijalni GPS. Prijemnici na fiksnim stanicama izračunavaju svoj položaj na osnovu GPS signala i porede ga sa stvarnim položajem. Usled različitih faktora koji unose grešku, stvarna i izračunata pozicija nisu jednake. Pošto se odredi greška u proračunu pozicije na lokaciji fiksne stanice, ona se koristi za korekciju pozicija na lokacijama u blizini. GPS prijemnici koji se nalaze u blizini fiksnih stanica dodatno primaju informaciju o vrednosti greške i koriste je za korekciju svoje pozicije.

11.4 Radio-sonde

Radio-sonde sadrže senzore za merenje atmosferskih promenljivih, obično pritiska, temperature i vlažnosti vazduha. Osim toga radio-sonda može da ima i senzore kojim se mogu meriti sunčevo i zemljino zračenje, koncentracija ozona, gradijent električnog potencijala, provodljivost vazduha i radioaktivnost atmosfere. Horizontalni vetar se meri praćenjem balona koji nosi radio-sondu ili na osnovu navigacionih uređaja. Radio-sonda se podiže meteorološkim balonom obično do visine od 30 km ili više. Za to vreme ona šalje izmerene podatke stanici na tlu pomoću radio predajnika. Radiofrekventni opsezi koje radio-sonda može da koristi su 27.5 do 28 MHz, 400 do 406 MHz, 1668 do 1700 MHz i 35.2 do 36 GHz.

Kako se radio-sonde najčešće koriste samo jedanput, moraju biti dizajnirane za masovnu proizvodnju sa malom cenom. Moraju da poseduju bateriju koja im može omogućiti rad za vreme od oko tri sata i emitovanje radio-signala na rastojanje najmanje 200 km. Zbog bezbednosti vazdušne plovidbe gustina sondi mora da bude mala, kako ne bi mogla da ošteti mlazni motor aviona u slučaju da bude usisana, niti da polomi vetrobransko staklo na avionu. Korišćeni senzori imaju kratak radni vek, a pre upotrebe se mogu dugo čuvati. Drift senzora mora da bude pažljivo kontrolisan ili se mora uraditi rekalibracija senzora neposredno pre puštanja balona.

Senzor za pritisak je obično aneroid sa jednom metalnom dijafragmom ili senzor sa silicijumskom dijafragmom. Ovi senzori su dizajnirani da imaju izlazni signal proporcionalan logaritmu pritiska, da bi se popravile karakteristike na većim visinama. I pored toga, osetljivost senzora sa metalnom dijafragmom je veoma mala na niskom pritisku ($p < 50$ mb), zbog čega se ponekad dopunjuju hipsometrom. Osetljivost hipsometra raste sa smanjenjem pritiska.

Senzor za temperaturu je termistor u obliku malog štapića ili temperaturno osetljivi kondenzator. Koeficijent inercije ovih senzora treba da bude mali. Tipična vrednost koeficijenta inercije za termistor u obliku štapa prečnika 1.27 mm je 4.5 s na pritisku od 1000 mb i raste do 10.6 s na 100 mb i do 30 s na 10 mb. Sa koeficijentom inercije od 30 s, senzor ne može da razlikuje 15 do 20 slojeva na vrhu merene oblasti. Drugo važno pitanje su radijacione greške. Brzina ventilacije senzora je oko 5 ms^{-1}, kao posledica podizanja sonde. Zaštita od radijacije je u obliku visoko reflektivnog premaza, a klasični zakloni se ne koriste za senzore u radio-sondama.

Senzori za vlažnost koji se koriste u radio-sondama su obično sorpcioni senzori, mada se koriste i psihrometarski senzori i skorije mali higrometri ohlađenog ogledala. Karakteristika sorpcionih senzora je da im se vreme reakcije povećava sa smanjenjem temperature, jer se smanjuje količina vodene pare na nižim temperaturama. Karbonski element je osetljiv na promenu temperature i podložan je promenama karakteristika sa vremenom zbog kontaminacije otporne površine. On se čuva u hermetički zatvorenom kontejneru neposredno do upotrebe, kada se kalibriše i smešta u sondu. Kalibracija se sastoji od merenja otpora senzora izloženog u sredini sa konstantnom relativnom vlažnošću od 33 %. Vlažnost se održava na tom nivou pomoću zasićenog rastvora soli.

Slike

1.1 Funkcionalni model jednostavnog mernog sistema. 2

1.2 Desetometarski stub za površinska merenja (Brock i Richardson, 2001). 7

1.3 Raspored instrumenata na meteorološkoj stanici severne hemisfere (WMO, 2012). 10

2.1 Proces statičke kalibracije (Brock i Richardson, 2001). 15

2.2 Koncept statičke linearnosti. Input je prikazan na apscisi a autput na ordinati (Brock i Richardson, 2001). 16

2.3 Primer histerezisa u senzoru za vlažnost (Brock i Richardson, 2001). 18

2.4 Uzorak gausovski raspodeljenog signala na levoj strani i odgovarajuća Gausova raspodela na desnoj strani (Brock i Richardson, 2001). 21

2.5 Bias i nepreciznost senzora. Senzor u panelu (a) nema bias i ima veliku nepreciznost; senzor u (b) je precizniji, ali ima veći bias i senzor u (c) nema bias i ima veoma malu nepreciznost (Brock i Richardson, 2001). 22

3.1 Razlika između temperature termometra, t, i konstantne temperature okolnog vazduha, θ, u funkciji vremena, za različite koeficijente inercije termometra. 28

3.2 Promena temperature termometra i temperature okolnog vazduha u funkciji vremena, za različite koeficijente inercije termometra, za $\theta_o = 25°\text{C}$, $t_o = \theta_o \pm 1°\text{C}$ i $\alpha = \pm 1/500$ s. 29

3.3 Promena temperature termometra i temperature okolnog vazduha u funkciji vremena, za različite koeficijente inercije termometra, za $t_o = \theta_o = 25°\text{C}$, $\alpha = 1/500$ s, $\lambda_1 = 20$ s i $\lambda_2 = 100$ s 30

3.4 Temperatura termometra, t (izmerena temperatura), i stvarna temperatura okolnog vazduh, a θ (izračunata temperatura), u funkciji vremena za $\lambda_2 = 30$s. 32

3.5 Maksimalni i minimalni termometar (SHMZ, 1974). 35

3.6 Šematski prikaz principa rada bimetalne trake. 36

3.7 Merni sistem koji je zasnovan na termoparu. Dve vrste metala su obeležene sa A i B. 39

3.8 Izlazni signal termopara bakar-konstantan i rezidualna nelinearnost. Rezidualna nelinearnost temperature ($T_{lin} - T$) je računata kao razlika temperature T_{lin}, koja odgovara pravoj isprekidanoj liniji koja najbolje fituje izlazni signal i temperature T koja je sa izlaznim signalom povezana jednačinom (3.51). Ove vrednosti su dobijene za slučaj kada je temperatura referentnog spoja održavana na 0°C. 41
3.9 Šematski prikaz strujnog kola u obliku Vitstonovog mosta sa otpornim temperaturnim detektorom otpora R_T i pojačivačem G. . . . 42
3.10 Otpor 500 Ω-skog platinskog RTD-a i pojačani izlazni napon iz Vitstonovog mosta ($G = 93$, $V_R = 1$ V). 43
3.11 Rezidualna nelinearnost otpornog platinskog detektora. Linearna rezidualna greška ($T_{lin} - T$) je prikazana isprekidanom linijom, kvadratna rezidualna greška ($T_{kv} - T$) prikazana je punom linijom. Temperatura T_{lin} se dobija linearnim fitovanjem kalibracione krive, a T_{kv} fitovanjem polinomom drugog stepena. 44
3.12 Otpor termistora 1 u funkciji temperature. Osetljivost opada sa porastom temperature. 45
3.13 Strujno kolo sa dva termistora, sa skoro linearnim izlaznim signalom. Isprekidana linija uokviruje troterminalni termistorski sklop. 45
3.14 Model transfera toplote provođenjem, konvekcijom i zračenjem. . . 47

4.1 Pritisak zasićene vodene pare u odnosu na ravnu površinu čiste vode u funkciji temperature (na osnovu jednačine (4.3)). Na manjoj slici prikazan je ravnotežni pritisak vodene pare u odnosu na ravnu površinu čistog leda, e_{si} i u odnosu na ravnu površinu čiste vode, e_{sw}. Tačkama B, C i D redom su obeležena mesta koje bi delić vazduha sa temperaturom i pritiskom vodene pare koji odgovaraju tački A imao ako bi se zasitio dodavanjem vodene pare, vlažnoadijabatski i hlađenjem bez dodavanja vodene pare. 51
4.2 Funkcionalni model psihrometra. Neobrađeni izlazni signali y_1 i y_2 posle kalibracije postaju T i T_w. 53
4.3 Izlazni signal psihrometra: psihrometarska razlika, $T - T_w$, u funkciji relativne vlažnosti, pri različitim temperaturama vazduha. . . . 57
4.4 Model ulazno izlaznih signala za neke električne higrometre. 59
4.5 Funkcija prenosa za higrometar sa dlakom. Na ordinati je nacrtana relativna dužina vlasi kose, $l(U)$, u odnosu na maksimalnu dužinu, $l(100\%)$. Za modul elastičnosti ljudske kose uzeta je vrednost $E = 5 \times 10^9$ Pa. 61
4.6 Apsorptivnost infracrvenog zračenja vodenom parom (Brock i Richardson, 2001). 62
4.7 Šematski prikaz moguće implementacije jednostavnog IR higrometra. 64
4.8 Šematski prikaz higrometra ohlađenog ogledala. Izvor svetlosti je LED dioda i fotodetektori registruju rasutu (#1) i reflektovanu (#2) svetlost. 65

4.9 Ravnotežni pritisak zasićene vodene pare iznad ravne površine zasićenog rastvora litijum-hlorida (linija crta-tačka-crta), ravne površine čiste vode (puna linija) i iznad leda (isprekidana linija). . . . 67
4.10 Ravnotežna vrednost relativne vlažnosti za zasićeni rastvor LiCl, u funkciji temperature. 68
4.11 Sistem za kalibraciju senzora za vlažnost vazduha. Željena vlažnost se generiše mešanjem suvog i zasićenog vlažnog vazduha. . . 69

5.1 Šematski prikaz diferencijalnog i apsolutnog manometra. 72
5.2 Šematski prikaz barometra sa živom. 73
5.3 Ilustracija primene Vernieove (Nonijusove) skale u barometrima sa tečnošću. 74
5.4 Funkcionalni dijagram barometra. 75
5.5 Poprečni presek jednostavne aneroidne komore sa ravnom (a) i naboranom (b) dijafragmom. 79
5.6 Količnik savijanja $\frac{y}{t}$ u funkciji pritiska za ravnu dijafragmu (isprekidana linija) i za naboranu dijafragmu (puna linija). 80
5.7 Grupa aneroidnih ćelija povezanih sa brojčanim indikatorom. 81
5.8 Aneroidna kapsula sa kapacitivnim pretvaračem. 82
5.9 Aneroidni barometar sa Burdonovom cevi. 83
5.10 Šematski prikaz hipsometarskog barometra. 83
5.11 Temperature ključanja različitih hipsometarskih tečnosti u funkciji pritiska. 85

6.1 Šematski prikaz horizontalnog preseka anemometra sa čašicama u polju vetra. Punom linijom je prikazan anemometar u početnom trenutku u stanju mirovanja, a isprekidanom linijom u trenutku kada se okreće i kada čašice imaju periferijsku brzinu u. 90
6.2 Anemometar u obliku sfere. 94
6.3 Ravnoteža sila za anemometar u obliku pločice. 95
6.4 Šematski prikaz Pitoove cevi i blok-dijagram za nju. Ulazni signal je brzina vetra, a izlazni je razlika ukupnog i statičkog pritiska $p_t - p$. 96
6.5 Izlazni signal Pitoove cevi Δp (hPa) u funkciji brzine vazduha V (ms^{-1}), pri $p = 1000$ hPa, $T = 20$ °C, $U = 75\%$. 97
6.6 Izlazni signal anemometra sa vrućom žicom (u obliku napona) u funkciji brzine vazduha. Korišćen je platinski senzor prečnika $d = 5$ μm i temperature $T_w = 500$ K. Slika je dobijena na osnovu jednačine (6.49), pri sledećim vrednostima: $T_a = 295$ K, $k = 0.0257$ Wm^{-1}K^{-1}, $\rho_e = 1.1 \times 10^{-7}$ Ωm, $\alpha = 3.9 \times 10^{-3}$ K^{-1}, $\mu = 1.82 \times 10^{-5}$ kgm^{-1}s^{-1} i $\rho = 1.25$ kgm^{-3}. 101
6.7 Šematski prikaz principa rada jednoosnog zvučnog anemometra. . . 102
6.8 Šematski prikaz vetrulje u polju vetra. Na aerodinamički centar krila deluju sila uzgona, $\boldsymbol{F}_u$, sila dinamičkog pritiska, $\boldsymbol{F}_{dp}$ i sila aerodinamičkog otpora, $\boldsymbol{F}_{ao}$. Takođe postoji sila trenja u osovini rotacije. 105
6.9 Amplituda oscilovanja vetrulje, pri stepenastom inputu ($\varphi_o = 1$, $\partial\varphi/\partial\tau(0) = 0$), za različite vrednosti koeficijenta prigušenja, ξ. 109

6.10 Amplituda oscilovanja vetrulje pri sinusoidnom inputu (puna linija) i amplituda oscilovanja vetra (isprekidana linija). Korišćene su sledeće vrednosti: $\varphi_{vo} = 1$, $\xi = 0.4$, $\omega = \omega_n = 0.25$. 111
6.11 Opšte rešenje za amplitudu oscilovanja vetrulje pri sinusoidnom inputu (puna linija) i amplituda oscilovanja vetra (isprekidana linija). Korišćene su sledeće vrednosti: $\varphi_{vo} = 1$, $\xi = 0.4$, $\omega = \omega_n = 0.25$. 112
6.12 Ilustracija definicija WMO za udare vetra. 113

7.1 Monohromatske iradijanse Sunca (levo) i Zemlje (desno) u $\mathrm{Wm}^{-2}\mu\mathrm{m}^{-1}$ prikazane na logaritamskoj apscisnoj osi. Monohromatska iradijansa Sunca je pomnožena korekcionim faktorom $C_s = 3.81 \times 10^{-6}$. . 117
7.2 Dve verzije piranometra sa toplotnim detektorom. Na levoj strani je piranometar sa detektorom toplote u obliku crne i bele pločice. Piranometar na desnoj strani ima samo crnu pločicu. Razlika temperature crne pločice i bele pločice ili kućišta se meri termoelementom. Nacrtani termoelementi su sastavljeni od dva termopara. Stvarni broj termoparova u senzoru piranometra je od 10 do 100. . . 120
7.3 Transmisivnost staklene kupole piranometra. 121
7.4 Relativna spektralna osetljivost silicijumskog detektora 123
7.5 Šematski prikaz površine tla sa koje do radiometra dolazi zračenje iz zenitnog ugla $0 \leq \phi \leq \phi_f$. 124
7.6 Kembel-Stoksov heliograf proizvodnje Lambrecht, laboratorija Instituta za meteorologiju Fizičkog fakulteta u Beogradu. 127

8.1 Šematski prikaz jednostavnog akumulacionog kišomera. 130
8.2 Šematski prikaz drugih tipova akumulacionih kišomera. 131
8.3 Šematski prikaz kapacitivnog kišomera sa sifonom. 132
8.4 Dielektrična konstanta vode u funkciji temperature. Tačkama su predstavljeni podaci iz Lide (2007). Isprekidanom linijom je prikazana funkcija $\kappa = 87.895 - 0.401 \cdot t + 0.00081607 \cdot t^2$, dobijena kvadratnom ekstrapolacijom podataka. 133
8.5 Kišomer sa klackalicom. 134
8.6 Šematski prikaz karakteristika kišomera sa klackalicom pri linearnom povećanju intenziteta padavina. Zapremina pojedinačnog suda kišomera je 0.2 dm^3. Kvadratićima je obeležen intenzitet padavina procenjen na osnovu broja zatvaranja kontakta prekidača u petominutnim intervalima. 136
8.7 Merač unapred rasute svetlosti. 138
8.8 Šematski prikaz senzora impaktnog disdrometra. 140
8.9 Zaklon kišomera u obliku zemljanog rova. 141
8.10 Kišomer sa Alterovim zaklonom, (a) i Nipherov kišomer, (b). 141
8.11 Sistem za automatsku kalibraciju kišomera. 142
8.12 Šematski prikaz komponenata radara. 144
8.13 Oblik signala pulsnog radara. Vreme emitovanja impulsa ili širina impulsa je τ. Vreme između početka jednog impulsa i početka narednog impulsa je *vreme ponavljanja impulsa* T_p. 145

8.14 Dve mete se mogu raspoznati ako se signali reflektovani od njih ne preklapaju. Rezolucija rastojanja radarskog signala širine impulsa τ je $\Delta R = R_2 - R_1 = c\tau/2$. Prikazani su položaji radarskih impulsa u različitim trenucima vremena, počev od t_o. Radijalna rastojanja meta su R_1 i R_2. 147
8.15 Šematski prikaz uzoračke zapremine radara. Ugaona širina snopa u vertikalnom pravcu je θ, a u horizontalnom je φ. Ugaona širina snopa je definisana kao ugao, u ravni u kojoj je osa glavnog loba, između dva pravca na kojima je emitovana snaga jednaka polovini snage na osi glavnog loba. 148
8.16 Dijagram zračenja antene FL2 radara, S-opsega, $\lambda \approx 10$ cm (Rinehart, 1991). 151
8.17 Dijagram zračenja antene radara, NCAR CP2, X-opsega, $\lambda \approx 3.2$ cm. Elevacioni i azimutni uglovi su u granicama od 0°, na osi glavnog loba, do ±5° sa svake strane glavnog loba, a interval je 0.1°. Horizontalne konture predstavljaju intervale relativnog pojačanja od 6 dB (Rinehart, 1991). 152
8.18 Šematski dijagram A-pokazivača. Prikazani su, redom, energija koja iz predajnika curi ka prijemniku, stalni odrazi, šum, izolovana tačkasta meta i udaljeni eho od meteorološke mete (Rinehart, 1991). 153
8.19 PPI prikaz radarske refleksivnosti generisan podacima konvencionalnog pulsnog radara Mitsubitsi RC34A, sa radarskog centra Sjenica, pri elevacionom uglu od $\varphi = 4°$. Intenzitet povratnih odraza meteoroloških meta prikazan je različito obojenim površinama. . . . 154
8.20 Zumirani RHI prikaz radarske refleksivnosti dobijen na osnovu podataka konvencionalnog pulsnog radara Mitsubitsi RC34A, sa radarskog centra Sjenica, pri azimutnom uglu od $\theta = 311°$. 155
8.21 Prikaz maksimalnih vrednosti radarske refleksivnosti, dobijen na osnovu podataka doplerovog radara Gematronik, sa radarskog centra Fruška gora. 156
8.22 Prikaz jednočasovnih akumuliranih padavina, dobijen na osnovu podataka doplerovog radara Gematronik, sa radarskog centra Bajša (Nadj i Babić, 2010). 156

9.1 Šematski prikaz Livingstonovog atmometra. 168
9.2 Opšti tipovi lizimetara (DeFelice, 2000). 170
9.3 Šematski prikaz neutronske probe (DeFelice, 2000). 172
9.4 Kontrolna zapremina korišćena pri izvođenju jednačina kontinuiteta mase i energije za isparavanje vode sa otvorenog cilindričnog rezervoara. 173

10.1 Funkcija prenosa za transmisiometar. 184
10.2 Merač unapred rasute svetlosti. 185
10.3 Silometar sa rotacionim izvorom ili rotacionim detektorom svetlosti. 186
10.4 Funkcija prenosa rotacionog silometra sa osnovnom linijom od 100 m. 187

11.1 Radarski profajler vetra RWP/RASS. 190
11.2 Koeficijent trenja za sferu u funkciji Rejnoldsovog broja. 193
11.3 Profili pritiska, temperature i gustine sa visinom u US standardnoj atmosferi. 194
11.4 Prečnik i vertikalne brzine balona punjenog vodonikom, w_{BH} i helijumom, w_{BHe}, pri njegovom podizanju u standardnoj atmosferi. . . 195
11.5 Geometrija pojedinačnog teodolita. φ je elevacioni, θ azimutni ugao, R je koso rastojanje od teodolita do balona i S je projekcija kosog rastojanja na horizontalnu ravan. 196
11.6 Određivanje horizontalne brzine vetra na osnovu položaja balona u pravilnim intervalima vremena. 197
11.7 Struktura podataka GPS signala. 202
11.8 Šematski prikaz GPS navigacije u dve dimenzije u slučaju kada prijemnici imaju apsolutno tačne časovnike. Moguće lokacije su obeležene tačkama x_1 i x_2. 203
11.9 Šematski prikaz GPS navigacije u dve dimenzije u slučaju kada prijemnici nemaju apsolutno tačne časovnike. Lokacija obeležena tačkom x_3 je netačna. 204
11.10 Šematski prikaz GPS navigacije sa tri satelita u dve dimenzije u slučaju kada prijemnici nemaju apsolutno tačne časovnike. 205

Tabele

2.1 Kalibracioni podaci za senzor za pritisak. 22

3.1 Karakteristike nekih termometarskih tečnosti. (T_F - temperatura topljenja, T_B - temperatura ključanja, β - koeficijent zapreminskog širenja, c - specifični toplotni kapacitet, k - toplotna provodljivost, kv - da li tečnost kvasi staklo). 34
3.2 Koeficijenti linearnog i zapreminskog širenja različitih materijala. . 38
3.3 Izlazni signal termopara bakar-konstantan u slučaju kada je temperatura referentnog spoja održavana na 0°C. 40
3.4 Otpor 500 Ω-skog platinskog RTD-a i pojačani izlazni napon iz Vitstonovog mosta (pri $V_R = 1.00$ V i $G = 93$). 43
3.5 Koeficijenti za dva termistora. 44

4.1 Koeficijenti za empirijsku jednačinu (4.3) za ravnotežni pritisak vodene pare iznad ravne površine čiste vode i iznad leda. 50
4.2 Srednje izduženje ljudske kose (u procentima od ukupnog izduženja) u funkciji relativne vlažnosti. 60
4.3 Koeficijenti standardne krive ravnotežnog pritiska vodene pare za zasićeni rastvor $LiCl \cdot nH_2O$ u funkciji temperature (Zeng i Zhou, 2006). 67
4.4 Vrednosti ravnotežne relativne vlažnosti za izabrane vodene rastvore soli za temperature 20, 25 i 30°C. 70

5.1 Parametri za neke hipsometarske fluide. Temperatura ključanja je data na standardnom pritisku (1013.25 mb). 84

7.1 Deo, f, ukupnog zračenja sa tla, E, koji dolazi iz kruga poluprečnika R do senzora koji je okrenut na dole na visini od $z = 3$ m. 125

8.1 Karakteristične vrednosti tipičnih meteoroloških radara. KPR označava konvencionalne pulsne radare, koji mere samo radarsku refleksivnost Z. 149

11.1 Karakteristike nekih meteoroloških balona. 192
11.2 Greške pri određivanju vektora vetra i visine navigacionim uređajima. 200

Bibliografija

Anderson, P. S., 1995: Mechanism for the behavior of hydroactive materials used in humidity sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol*, **12**, 662–667.

Battan, J. L., 1973: *Radar observation of the atmosphere*. The University of Chicago Press, 324 pp.

Brock, V. F. i J. S. Richardson, 2001: *Meteorological Measurement Systems*. Oxford University Press, 290 pp.

Buck, A. L., 1981: New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *J.Appl.Meteor*, **20**, 1527–1532.

Chow, V. T., D. R. Maidment, i L. W. Mays, 1988: *Applied hydrology*. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineeing: McGraw-Hill, New York, Paris.

DeFelice, P. T., 2000: *An introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 229 pp.

Denton, D. D., J. B. Camou, i S. D. Senturia, 1985: Effects of moisture uptake on the dielectric permittivity of polyimide films. *In Moisture and Humidity, Int. Symp. on Moisture and Humidity*, Research Triangle Park, NC. Instrumentation Society of America, Washington, DC, USA, 505–513.

Doebelin, E. O., 1983: *Measurement Systems: Application and Design*. McGraw-Hill, New York, 876 pp.

Doneaud, A. A., S. Ionescu-Niscov, D. L. Priegnitz, i P. L. Smith, 1984: Area-time integral as an indicator for convective rain volumes. *J.Climate Appl.Meteor*, **23**, 555–561.

Kacurin, 1985: *Metod meteorologiceskix izmereni*. Gidrometeoizdat, Leningrad, 455 pp.

Keeler, R. i R. Serafin, 2008: Chapter 19 - meteorological radar. McGraw-Hill Companies, 19.1-19.33 pp.

Lathi, B. P., 1998: *Modern Digital and Analog Communication Systems*. Oxford University Press: 3rd edition, 780 pp.

Lide, D. S., 2007: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Taylor and Francis, Boca Raton, FL, 2389 pp.

Lopez, R., D. O. Blanchard, R. L. Holle, J. L. Thomas, D. Atlas, i D. Rosenfeld, 1989: Estimation of areal rainfall using the radar echo area time integral. *J.Appl.Meteor.*, **28**, 1162–1175.

Middleton, W. E. K., 1957: *Vision through the Atmosphere*: volume 10/48. Springer Berlin Heidelberg, 254-287 pp.

Morillon, V., F. Debeaufort, J. Jose, J. F. Tharrault, M. Capelle, G. Blond, i A. Voilley, 1999: Water vapour pressure above saturated salt solutions at low temperatures. *Fluid Phase Equilibria*, **155**, 297–309.

Nadj, J. i Z. Babić, 2010: Serbian radar network - possible applications for quantitative precipitation estimation. *Proceedings from the Regional Expert Meeting - Regional Rainfall 2010*, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Belgrade, Serbia.

Norment, H. G., 1992: Calculation of wyngaard turbulence distortion coefficients and turbulence ratios; and influence of instrument-induced wakes on accuracy. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **9**, 505–519.

Oost, W. A., 1991: Flow distortion by an ellipsoid and its application to the analysis of atmospheric measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **8**, 331–340.

Penman, H. L., 1948: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **193**, 120–145.

Priestley, C. H. B. i R. J. Taylor, 1972: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon.Wea.Rev*, **100**, 81–92.

Probert-Jones, J. R., 1962: The radar equation in meteorology. *Quart.J.Roy.Meteor.Soc*, **88**, 485–495.

Richardson, S. J. i F. V. Brock, 1995: Passive solar radiator shields: Energy budget-optimizing shield design. *Preprints 9th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Amer. Meteor. Soc., Charlotte, 259–264.

Rinehart, R. E., 1991: *Radar for Meteorologists*. Knight Printing Co., Fargo, North Dakota, 334 pp.

SHMZ, 1974: *Uputstvo za osmatranja i merenja na glavnim meteorološkim stanicama*. Savezni hidrometeorološki zavod, Beograd, SFRJ.

Stigter, C. i A. Welgraven, 1976: An improved radiation protected differential thermocouple psychrometer for crop environment. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, **24**, 177–187.
URL

Tropea, C., A. L. Yarin, i J. F. Foss, 2007: *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*: volume 46. Springer, 2653–2655 pp.
URL

Turtiainen, H., S. Tammela, i I. Stuns, 1995: A new radiosonde temperature sensor with fast response time and small radiation error. *Preprints 9th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*, Amer. Meteor. Soc., Charlotte, 60–64.

Vučković, V., 1990: *Procena padavina ATI metodom*. Diplomski rad: Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Beogradu.

Wexler, A., 1970: Measurement of humidity in the free atmosphere near the surface of the earth. *Meteor. Monogr*, **11(33)**, 262–282.

— 1976: Vapor presure formulation for water in range 0°to100° - a revision. *J.Res.Natl. Bur. Stand*, **80A**, 775 ff.

— 1977: Vapor presure formulation for ice. *J.Res.Natl. Bur. Stand*, **81A**, 5–20.

WMO, 1992: *Measurements of Air Temperature and Humidity (R. G. Wylie and T. Lalas)*. WMO-No. 759., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

— 2003: *Manual on the Global Observing System*. WMO-No. 544., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

— 2006: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. 7th ed. WMO No. 8., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

— 2012: *Guide to Global Observing System*. 2010 edition, updated 2012, WMO-No. 488., Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

Yang, J., B. Li, i L. Shiping, 2000: A large weighing lysimeter for evapotranspiration and soil-waterâĂŞgroundwater exchange studies. *Hydrol. Process.*, **14**, 1887âĂŞ1897.

Zeng, D. i J. Zhou, 2006: Thermodynamic consistency of the solubility and vapor pressure of a binary saturated salt + water system. 1. LiCl+H_2O. *J.Chem.Eng.Data*, **51**, 315–321.

Indeks

albedometar, 118, 122
analogni signal, 13
Anemometar
    sa čašicama, 90
anemometar, 5, 11, 89–93, 112, 113
    sa šašicama, 2
    konstantne struje, 98
    konstantne temperature, 99
    Pito cev, 97
    sa čašicama, 10
    sa vrućom žicom ili filmom, 98
    u obliku cilindra ili sfere, 93
    u obliku pločice, 95
    u obliku sfere, 94
    Zvučni, 102

barometar, 71–74, 76, 78, 82, 83
    živin, 72, 74, 75, 85, 86
    aneroid, 72, 78–82, 84, 86
bias, 20

daljinska merenja, 189
data loger
    definicija, 13
digitalni signal, 1, 3, 14, 40, 82, 201
displej podataka, 13, 14
drift, 3, 4, 14, 17, 58, 59, 64, 81, 82, 86, 97, 206
drop sonde, 191

funkcija prenosa, 56

gausova raspodela, 20
grafik transfera, 16

heliograf, 125
hipsometar, 82–85
histerezis, 17

instrumentalna greška, 20
izlaganje
    anemometara, 112
    instrumenata za merenje zračenja, 123
    kišomera, 140
    senzora za temperaturu, 46

kalibracija
    postupak, 18
kalibraciona jednačina, 19
katatermometar, 97
kondicioniranje signala, 14

linearnost, 17

meteorološki balon, 191, 192, 194–199, 206
    brzina podizanja, 193, 194
    konstantne visine, 192
    nerastegljivi, 192
    prečnik,brzina podizanja, 194
    rastegljivi, 192
    sa radio-sondom, 197
    visina, 197

nepreciznost, 20
netačnost, 20

opseg, 16
otporni temperaturni detektori, 41

pilot balon, 196
piranometar, 118, 120–122
    fotonaponski, 122
    neto, 122
    sa toplotnim detektorom, 120
    zaklonjen senilom, 122
pirgeometar, 118, 123
pirheliometar, 118, 119, 124
    apsolutni, 119
pirradiometar, 118, 123
    neto, 118

prag, 17
pretvarač, 15
profajler vetra, 190
psihrometar, 35

raspon, 16
rezolucija, 17
RMS, 21

senzor, 1–7, 10, 13–23, 33, 36, 38–42, 46–48, 52, 53, 57–59, 63–65, 69, 70, 72, 73, 78, 80–84, 86, 89, 90, 98, 99, 104, 118–121, 129, 132, 133, 136, 137, 139, 140, 184, 189, 191, 206
  vlažne ćelije, 67
  za pritisak, 206
  za temperaturu, 206
  za vlažnost, 206
signal, 14
slučajna greška, 17
stabilnost, 17
standardna devijacija, 20
statička kalibracija, 15
statička osetljivost, 16, 57

teodolit, 196
termistori, 41
termometar, 4, 7, 10, 25, 27–35, 46, 82, 97, 168
  živin, 2
  električnog otpora, 40
  Maksimalni, 35
  maksimalni i minimalni, 35
  Minimalni, 36
  otporni, 41
  platinski otporni, 26
  sa tečnošću, 34, 35
  stanični, 35
  temperature zemljišta, 36
  tla, 10
  trave, 10
termometarski zaklon, 10, 38
transmisija podataka, 14

visinska merenja, 189
Vitstonov most, 43, 44